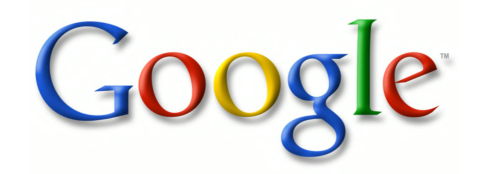
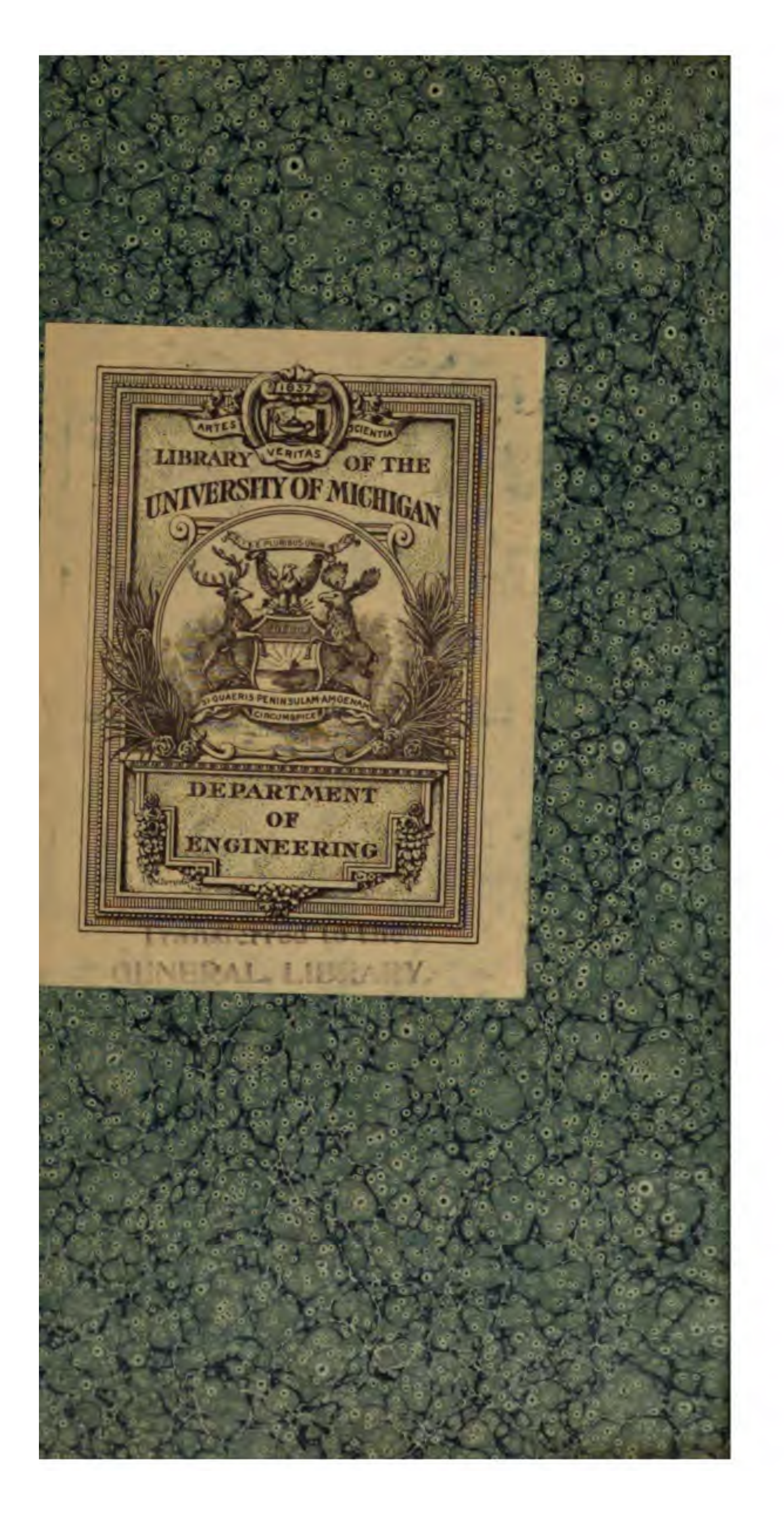



1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING



MANUEL
DES ASPIRANTS
AU GRADE
D'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES.

PARIS. — IMPRIMERIE DE MALLET-BACHELIER,
rue du Jardinet, 12.

MANUEL
DES ASPIRANTS

AU GRADE

D'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES.

GUIDE

DU CONDUCTEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES, DE L'AGENT VOYER,
DU GARDE DU GÉNIE ET D'ARTILLERIE,

RÉDIGÉ

D'APRÈS LE NOUVEAU PROGRAMME OFFICIEL,

PAR J. REGNAULT,
Bachelier ès Sciences Mathématiques.

Partie théorique. — Tome second.

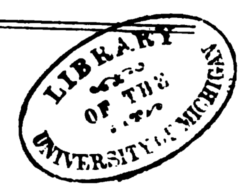
PARIS,
MALLET-BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
QUAI DES AUGUSTINS, 55.

1855

MANUEL DES ASPIRANTS

AU

GRADE D'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES.



PHYSIQUE.

Objet de la physique. — La physique a pour objet l'étude de la nature des corps, c'est-à-dire l'étude des propriétés les plus générales que présentent les matières inertes à l'état solide, à l'état liquide, à l'état de fluide aériforme ou gazeux, et à celui de fluide incoercible ; elle examine aussi les actions mécaniques que les corps peuvent exercer les uns sur les autres, et les différentes circonstances de leurs mouvements.

On nomme *espace* infini ou absolu, l'idée qui reste après avoir fait abstraction par la pensée de tous les corps de l'univers. Chaque partie de cet espace ou de ce vide qu'on peut concevoir, limitée de différentes manières, se nomme espace limité ou espace relatif.

On nomme *corps*, l'étendue limitée douée de propriétés matérielles que nos sens peuvent percevoir de différentes manières.

Propriétés générales des corps. — Ce qui distingue en général un corps d'une simple étendue ou d'un vide est l'impénétrabilité, c'est-à-dire la propriété qu'a un corps d'exclure du lieu qu'il occupe tous les autres corps. Pour bien entendre cette propriété, il faut distinguer l'espace d'un corps circonscrit par la continuité apparente de sa surface de l'espace réel qu'il occupe.

Tous les corps sont plus ou moins poreux, et c'est à la faveur de ces pores que plusieurs se laissent, en apparence, pénétrer, et subissent divers changements remarquables. C'est l'impénétrabilité qui annonce l'existence d'une manière quelconque ; c'est la même propriété qui donne lieu aux divers genres de mouvements : car si les corps étaient pénétrables, ils ne pourraient recevoir aucune sorte d'impulsion, ni en donner aucune. D'ailleurs, on ne saurait concevoir des mouvements là où il n'existe rien ; on peut, partout où l'on reconnaît qu'il y a du mouvement, annoncer, par cela même, l'existence d'un corps.

Outre l'étendue et l'impénétrabilité, les corps ont encore les propriétés suivantes : la porosité, la divisibilité, la mobilité, l'inertie, la compressibilité, l'élasticité et la pesanteur.

Les corps se présentent à nous sous quatre états différents : à l'état solide, à l'état liquide, à l'état de fluide aériforme ou gazeux, et à celui de fluide incoercible.

On entend par corps solides, ceux qui, comme la pierre, le bois, etc., présentent, au toucher, une résistance assez sensible pour

pouvoir être saisis et pressés entre les doigts; ils conservent les figures qu'on leur procure ou qu'ils peuvent avoir naturellement.

Les corps liquides sont ceux qui, comme l'eau, ne manifestent immédiatement au toucher qu'une très-faible résistance, assez sensible cependant pour indiquer leur présence même dans le temps de repos; ils ne peuvent être saisis entre les doigts, et ne conservent de figure que celle qu'on peut leur faire prendre dans des vases.

Les fluides aériformes sont des corps la plupart invisibles, qui, comme l'air qui nous entoure, ne peuvent être palpés et ne manifestent, en aucune manière, leur présence au toucher lorsqu'ils sont en repos; mais on reconnaît leur existence avec certitude, lorsqu'ils sont en mouvement : c'est ainsi que nous reconnaissons la corporalité de l'air atmosphérique d'après l'effort que nous avons à supporter quand nous sommes exposés à un grand vent. D'ailleurs, nous verrons qu'on peut les renfermer dans des vases d'où ils excluront les liquides, qu'on pourra les y comprimer, et qu'ils résisteront à la pression avec une très-grande force.

Les fluides incoercibles ou impondérables sont au nombre de quatre; ils ont été imaginés pour expliquer les phénomènes de la chaleur, de l'électricité, du magnétisme et de la lumière. On n'a pu encore constater ni leur impénétrabilité ni leur poids, ce qui rend leur existence assez douteuse; néanmoins, elle paraît assez bien prouvée par les diverses circonstances de leurs mouvements.

Mobilité. — On appelle mobilité, la faculté qu'a un corps d'être transporté d'un lieu dans un autre. Cette propriété appartient à tous les corps de la nature, puisqu'il n'y a pas de corps qui ne puisse être mis en mouvement par une cause quelconque qu'on nomme *force*.

Divisibilité. — Quand on a conçu l'idée de l'étendue, on acquiert celle de la divisibilité : car si un corps a de l'étendue, on peut en concevoir la moitié, puis la moitié de cette moitié, et ainsi de suite, à l'infini : c'est là ce qu'on nomme la divisibilité géométrique; mais on ignore si, par des moyens mécaniques, il est possible de diviser un corps à l'infini; tout ce que l'expérience nous apprend, c'est que plusieurs corps peuvent être divisés en particules si ténues, qu'elles deviennent imperceptibles à nos sens. Par exemple, 1 centigramme d'indigo donne une teinte bleue assez intense à 100 000 grammes d'eau; mais chaque gramme peut se diviser facilement en 100 parties, de sorte que 1 centigramme d'indigo est divisible en 10 millions de parties.

Porosité. — Les molécules d'un corps dans leur réunion ne se trouvent pas en contact immédiat; l'intérieur des corps solides est criblé d'une infinité de pores. On prouve la porosité des corps solides par diverses expériences. La peau est un corps très-poreux : car si l'on enferme du mercure dans une peau dépouillée de son épiderme, et qu'on le soumette ensuite à une pression même assez faible, on voit ce métal sortir sous la forme d'une pluie fine. Les fontaines filtrantes de pierre, dont nous nous servons dans nos maisons, nous offrent une preuve de la porosité de la pierre qu'on emploie à leur construction.

Il est difficile, cependant, de reconnaître la porosité dans certains corps, comme dans le verre; mais la faculté de diminuer de volume,

en passant d'une certaine température à une autre plus basse, semble prouver que les molécules, dans le premier cas, étaient plus écartées que dans le second, et que, par conséquent, elles ne se touchent pas, puisqu'elles peuvent être plus ou moins rapprochées.

La faculté qu'ont certains corps d'imbiber les liquides est une preuve de porosité; mais tous les corps n'imbibent pas indifféremment tous les liquides : le marbre n'imbibe pas aussi sensiblement l'eau que l'huile; le bois, au contraire, imbibe plus facilement l'eau que l'huile.

Il y a des liquides qui, en s'introduisant dans les solides, en augmentent plus ou moins le volume : l'eau produit cet effet sur presque tous les corps. Si, après avoir mesuré une petite bande de papier, on la trempe dans l'eau, on reconnaît, en la mesurant de nouveau, qu'elle est augmentée dans toutes ses dimensions. On fait cette expérience toutes les fois qu'on tend une feuille de papier sur une planchette pour dessiner.

Il existe plusieurs corps qui s'allongent dans les temps humides, en absorbant l'eau qui se trouve dans l'atmosphère : ceux de ces corps qui sont tortillés comme les cordes à boyaux, s'allongent et se détendent en même temps. Lorsqu'on plonge une corde dans l'eau, elle augmente de diamètre et diminue de longueur; ces deux effets sont une conséquence l'un de l'autre : ils sont dus à l'obliquité des fibres qui sont tortillées en spirale. La corde, par le desséchement, ne revient jamais à son état primitif, parce que les particules éprouvent trop de frottement pour pouvoir glisser les unes sur les autres.

Lorsqu'on veut courber une pièce de bois, par exemple, on allume du feu sous une face, et l'on mouille la face opposée : le feu enlève l'humidité dans la première face et la rétrécit; l'humidité dilate la seconde : ces deux effets concourent au même but et courbent la pièce.

Densité des corps. — L'espace occupé tant par les pores que par la substance, constitue le volume d'un corps. La quantité de matière d'un corps, abstraction faite des pores, constitue sa masse. On voit que deux corps d'un égal volume peuvent avoir des masses différentes, et réciproquement : de là résulte une quantité des corps relative à la quantité plus ou moins grande de matière sous un même volume; c'est ce qu'on nomme *la densité*. Les densités de plusieurs corps sont proportionnées à leurs masses sous un même volume, et quand les volumes sont différents, les densités sont proportionnelles au rapport des masses aux volumes; on dit, par cette raison, que *la densité* est le rapport de la masse au volume. Cette propriété suppose que chaque corps est homogène, c'est-à-dire que les quantités de matière contenues dans deux parties quelconques d'un même corps sont proportionnées au volume de ces parties.

Inertie. — La nature ne nous offre aucun exemple d'un corps inorganique qui passe de l'état de repos à l'état de mouvement, et réciproquement, sans que ce changement ne soit la suite d'une action exercée sur ce corps par un agent extérieur. Si les animaux ont la faculté de se mouvoir de diverses manières, ce ne peut être que par l'action d'un agent qui est indépendant de la matière, puisque ces corps, une fois privés de la vie, ne peuvent prendre d'eux-mêmes

aucun mouvement. D'après cela, on admet comme vérité que la matière ne peut par elle-même, c'est-à-dire sans l'action d'un agent qui en est indépendant, changer son état de repos ou de mouvement; c'est cette loi qu'on nomme *inertie de la matière.*

Repos absolu, repos relatif, mouvement absolu, mouvement relatif. — Les corps se présentent à nous à l'état de repos et à l'état de mouvement. Nous jugeons qu'un corps est en repos, quand toutes les parties qui le composent persévèrent constamment dans les mêmes rapports de situation relativement à certains objets que nous regardons comme fixes.

Nous jugeons qu'un corps est en mouvement, lorsque ce corps ou ses différentes parties changent de situation relativement à ces mêmes objets. Il est quelquefois très-difficile de juger si un corps est à l'un ou à l'autre état. En général, toutes les fois que nous sommes entraînés d'un mouvement commun avec les corps qui nous environnent, il nous est impossible de juger du mouvement de ces corps; nous les croyons en repos; mais le repos n'est qu'apparent : c'est le cas où nous nous trouvons à la surface de la terre. Les corps que nous y croyons en repos sont entraînés avec nous dans le mouvement de rotation diurne de ce globe sur son axe et dans son mouvement annuel autour du soleil.

On distingue le repos vrai ou absolu, et le repos apparent ou relatif : le repos absolu est l'idée que nous nous formons d'une privation totale de mouvement, c'est-à-dire d'une permanence du corps et de ses différents points dans le même lieu de l'espace absolu; le repos relatif est la permanence du corps ou de chacun de ses différents points dans le même lieu d'un certain espace limité que l'on considère comme en repos, quoique réellement il puisse être en mouvement, soit dans l'espace absolu, soit même dans un autre espace limité. Par suite, on distinguera aussi le mouvement relatif et le mouvement absolu.

Compressibilité. — On nomme compressibilité la propriété qu'ont certains corps de pouvoir diminuer de volume par l'action d'une cause extérieure, comme la pression, la percussion, etc. On nomme plus particulièrement *condensation* la faculté que possèdent les corps de pouvoir diminuer de volume en passant d'une certaine température à une autre plus basse : dans les deux cas, il faut concevoir que les molécules se rapprochent les unes des autres. Dans les substances dont la porosité se manifeste immédiatement à l'œil, comme dans le bois de liége, les éponges, etc., la compressibilité est extrêmement sensible. Ainsi, en pressant entre ses doigts un morceau de liége, un morceau de moelle de sureau, on suit, pour ainsi dire, de l'œil le rapprochement des molécules. Dans ces différents corps, les pores s'aplatissent et leurs parois se rapprochent. Il y a des corps poreux dans lesquels la compressibilité ne se manifeste pas, parce que les parois de leurs pores ne peuvent se déformer sans se briser, comme la pierre ponce, etc.

Élasticité. — On nomme élasticité la propriété que possèdent certains corps de se conserver d'une manière permanente à un volume et à une forme déterminés, et d'y revenir, lorsqu'ils en ont changé par une cause quelconque. Un grand nombre de corps poreux, sus-

ceptibles d'être comprimés, possèdent la propriété de revenir à leur premier volume, lorsque la force comprimante cesse d'agir. On suppose que ce retour au volume naturel s'effectue en vertu de la tendance que possèdent les parois de chaque petite cellule, de se conserver d'une manière permanente à une forme déterminée, et d'y revenir aussitôt que la force qui les avait déformées a cessé son action. La même hypothèse peut être aussi appliquée à l'élasticité des corps peu poreux. Pour expliquer l'élasticité qui se manifeste dans une lame d'acier, une lame de verre, qu'on a courbée, et qui revient à sa première forme lorsqu'on l'abandonne à elle-même, on suppose que, pendant que la lame est courbée, les particules de la partie convexe de la courbure sont écartées les unes des autres, et que celles de la partie concave sont rapprochées; les unes et les autres tendent à reprendre leurs distances mutuelles naturelles, et les deux effets qui en résultent concourent au même but, et sollicitent le corps à reprendre sa première forme.

La forme du corps influe beaucoup, dans certaines circonstances, sur le degré d'élasticité. Par exemple, un anneau d'une substance quelconque qu'on jette de champ sur un plan de marbre rebondit plus fortement qu'un disque du même poids; le choc détermine l'anneau à s'élargir dans le sens horizontal, de sorte qu'il se fait dans tous les points de cet anneau, des déplacements de particules, et le retour de toutes ces particules à la première position ramène avec force le corps à sa première forme, tandis que dans un disque du même poids que l'anneau, il n'y a de déplacement de particules qu'autour du point choqué. Le retour des parties déplacées à leur position naturelle ne se fait pas brusquement; il a lieu par une suite d'oscillations au moyen desquelles ces particules sont transportées successivement en deçà et au delà de leur position naturelle; les vitesses de ces oscillations vont toujours en décroissant, jusqu'à zéro, où l'ordre est rétabli. C'est ce qu'on peut voir facilement dans les branches d'une pincette qu'on a approchées l'une de l'autre, et qu'on laisse agir ensuite librement.

Pesanteur. — On nomme gravité ou pesanteur la force en vertu de laquelle un corps abandonné à lui-même se précipite vers la terre. Le premier effet de la pesanteur est la pression dirigée vers la terre que chaque corps exerce sur les corps placés au-dessous de lui. Cette pression, dont l'intensité déterminée s'appelle le poids du corps, peut être mesurée exactement au moyen des balances; elle est invariable, quelque changement qui puisse se faire dans la forme, la position, l'extension et les propriétés chimiques des corps, pourvu cependant qu'aucune matière pondérable ne lui soit enlevée ni ajoutée. Cette circonstance autorise à conclure que le poids d'un corps dépend seulement de la quantité de la matière qu'il contient, parce que la masse doit lui être proportionnelle. Si un corps pesant n'est pas soutenu, il tombe avec un mouvement croissant ou accéléré dont nous examinerons la loi. On nomme la direction de la chute la ligne à laquelle est perpendiculaire la ligne horizontale. On appelle ligne horizontale la direction que prend naturellement, dans chaque lieu, la surface des eaux tranquilles.

Lorsque nous comparons les directions de la pesanteur dans des lieux très-voisins les uns des autres, elles nous paraissent parallèles, mais la connaissance plus exacte du globe terrestre a appris qu'elles sont partout dirigées vers le centre de la terre.

Dans un espace vide, tous les corps tombent avec une vitesse égale.

Un corps qui tombe sans obstacle parcourt, dans la première seconde, un espace égal à $4^{m},905$.

Tant qu'on reste dans le même lieu, la pesanteur est invariable; les observations du pendule ont confirmé l'assertion de Newton, que la pesanteur ne doit pas être la même par toute la terre, et que son intensité doit être plus faible à l'équateur que sous les pôles. Cette variation résulte de ce que la terre n'est pas tout à fait ronde; mais comme la quantité dont elle diffère de la sphère est très-peu considérable, l'inégalité qui en résulte dans la pesanteur est pareillement très-petite. On a trouvé la pesanteur un peu moindre sur les montagnes très-élevées que dans les plaines. Cette observation conduit naturellement à penser que la pesanteur décroît à mesure que l'on s'éloigne du centre de la terre. Newton a démontré qu'une attraction réciproque existe entre tous les corps de la nature, et qu'elle est en raison directe de la masse du corps qu'elle attire et en raison inverse du carré de la distance du corps attiré.

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS.

Lorsqu'un corps tombe par la seule action de la pesanteur, sa vitesse croît à chaque instant, parce que la pesanteur agit continuellement sur lui durant la chute; mais comme la pesanteur dans chaque point de la terre, et pour de petites hauteurs de chute, peut être considérée comme une force invariable, la vitesse d'un corps tombant doit s'accroître précisément autant dans un instant que dans un autre : c'est pour cela qu'on dit que la chute des corps a un mouvement uniformément accéléré.

La chute des corps est beaucoup trop rapide pour que les lois de son mouvement puissent être étudiées par une observation immédiate. Mais la machine inventée par Atwood donne le moyen de retarder la chute, de sorte que, sans changer les lois essentielles du mouvement, on peut observer les mouvements de seconde en seconde.

La machine d'Atwood est composée d'une poulie suspendue entre deux montants de bois de 2 mètres de hauteur (*fig.* 1, *Pl. I*), un fil assez solide pour ne pas rompre passe sur la gorge de la poulie et supporte deux poids égaux; une échelle, divisée en parties égales, est placée vis-à-vis ces deux poids. Un poids P étant placé à zéro de l'échelle, si on lui ajoute un petit poids (la valeur de ce poids est déterminée par les expériences faites pour diviser l'échelle) pour rompre l'équilibre, on observera qu'à la fin de la première seconde, le corps P aura parcouru 100 millimètres; à la fin de la deuxième seconde, il en aura parcouru 400; à la fin de la troisième, il en aura parcouru 900; à la fin de la quatrième, il en aura parcouru 1600, etc.: d'où l'on voit que les espaces parcourus depuis l'origine du mouvement sont comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, 36, etc., c'est-à-dire comme les carrés des temps.

Si, dans la première seconde, un corps parcourt un intervalle, quatre dans les deux premières secondes, neuf dans les trois premières secondes, etc.,

Dans la deuxième seconde, il parcourra $4 - 1 = 3$;
Dans la troisième seconde, il parcourra $9 - 4 = 5$;
Dans la quatrième seconde, il parcourra $16 - 9 = 7$;
Dans la cinquième seconde, il parcourra $25 - 16 = 9$.

Ou bien, pour rendre cette loi sous une autre expression, dans la deuxième seconde, un corps parcourra un espace égal au double de l'espace parcouru pendant la première seconde moins un, c'est-à-dire

$2 \times 2 - 1 = 4 - 1 = 3$;

Pendant la troisième seconde, il parcourra $3 \times 2 - 1 = 6 - 1 = 5$;

Pendant la quatrième seconde, il parcourra $4 \times 2 - 1 = 8 - 1 = 7$;

Pendant la soixantième seconde, il parcourra $60 \times 2 - 1 = 120 - 1 = 119$;

et, si l'on multiplie 119 par $4^m,905$, espace parcouru pendant une seconde, on trouve 584 mètres parcourus pendant la soixantième seconde, et pendant les soixante secondes il aura parcouru $\frac{584^2}{20} = 17\,052$ mètres.

Au moyen de cette machine, on peut encore démontrer qu'après un temps quelconque la gravité, comme toute force accélératrice, a communiqué au mobile une vitesse capable de lui faire parcourir uniformément, dans le même temps, un espace double de celui qu'il a déjà parcouru. Pour cela, on dispose un anneau dans lequel le mobile P puisse passer en descendant; on ajoute à ce mobile, pour rompre l'équilibre, un barreau d'une longueur plus grande que le diamètre de l'anneau et qui puisse être retenu par cet anneau pendant la chute. Par cette disposition, il arrive que le corps P se meut d'un mouvement accéléré tout le temps qu'il supporte le poids ajouté; mais, aussitôt qu'il s'en trouve déchargé en traversant l'anneau, il ne se meut plus que d'un mouvement uniforme en vertu de la vitesse qu'il a acquise. On reconnaît alors que l'espace que ce corps parcourt uniformément dans un temps égal à celui qu'il a déjà employé est précisément le double de celui qu'il a parcouru. Ainsi, si le corps a parcouru 400 millimètres pendant deux secondes, où la vitesse était accélérée, il parcourra 800 millimètres pendant deux secondes, lorsque son mouvement sera devenu uniforme. En plaçant successivement l'anneau vis-à-vis différents points de l'échelle, on fait voir par expérience que les vitesses acquises sont proportionnelles aux temps écoulés depuis l'origine du mouvement.

La chute d'une pierre est d'autant plus à craindre que ce corps est tombé de plus haut; cela tient à l'accélération du mouvement : car la vitesse devenant très-grande, la quantité de mouvement devient très-considérable, et, partant, le choc qui a lieu à la rencontre d'un obstacle est d'autant plus fort.

En partant de ce fait, démontré par l'expérience, que la gravité est une force accélératrice constante, et que les corps parcourent à Paris, $4^m,905$ dans la première seconde de leur chute, il est facile de résoudre le problème suivant : Sachant qu'une pierre a employé cinq secondes à tomber du haut d'une tour ou d'un puits, on demande la hauteur de la tour ou la profondeur du puits. Pour résoudre ce problème, il faut faire usage du rapport des espaces aux carrés des temps, et l'on dira :

$1''$ (carré de 1) : $25''$ (carré de $5''$) :: $4^m,905$ (espace parcouru dans la première seconde) : x (espace parcouru pendant cinq secondes), d'où

$$x = 4^m,905 \times 25 = 122^m,50.$$

Lorsqu'un corps est élancé vers le haut en direction verticale, il est clair que la pesanteur diminue uniformément sa vitesse, précisément comme elle s'accroît dans sa chute et dans un rapport exactement égal.

Le corps s'élève donc jusqu'à ce que toute sa vitesse soit détruite par l'action continue de la pesanteur; ensuite il retombe, et l'on conçoit qu'il reprend à chaque point de son chemin la même vitesse qu'il avait à ce point en s'élevant. Cette remarque fournit un moyen de trouver la hauteur où parviendra le corps, si l'on connaît la vitesse de projection avec laquelle il s'élève.

Les propositions qu'on vient d'exposer ne peuvent avoir rigoureusement leur effet que pour la chute des corps dans un espace vide; dans l'air, au contraire, il ne peut y avoir aucun mouvement tout à fait uniformément accéléré, puisque le corps tombant doit mettre à chaque instant une certaine quantité d'air en mouvement, et qu'autant il communique de mouvement à l'air, autant il en perd lui-même. Si donc un corps tombant a peu de masse, mais beaucoup de volume, on conçoit que son mouvement doit être fort retardé par la résistance de l'air, et c'est aussi ce que confirme l'expérience: Réciproquement, la vitesse de l'air est d'autant moins sensible, que la surface du corps tombant est plus petite et sa masse plus grande.

Description de la machine d'Atwood. — Pour éviter le frottement, on fait poser chaque extrémité de l'axe de la poulie sur deux autres poulies plus petites dont les axes roulent sur des pleins d'agate (*fig.* 1, *Pl. I*). Pour mesurer les espaces avec exactitude, on dispose près de la colonne une règle verticale et divisée, que la masse $m + \mu$ doit suivre dans sa chute, sans la toucher. Sur cette règle, se meuvent deux curseurs, l'un A, en forme d'anneau, pour laisser passer la masse m et pour arrêter la masse μ, que l'on fait un peu plus longue; l'autre, C, en forme de plan, pour recevoir la masse m et l'arrêter où l'on veut.

Pour compter le temps pendant lequel le mobile s'est mû, on adapte auprès de la machine une horloge à secondes, et on la fait communiquer à une détente particulière qui soutient la masse $m + \mu$ vis-à-vis le sommet de la règle, où se trouve le zéro de sa division. A un instant donné, la détente part, le poids tombe, et l'horloge continue de marquer le temps qui s'écoule.

Manière de faire les expériences. — On place l'anneau de la règle à une hauteur telle, qu'il arrête la masse μ après une seconde de chute depuis l'instant du départ. Pour cela, on l'élève et on l'abaisse peu à peu, jusqu'à ce que le bruit de la masse μ, au moment où elle frappe, coïncide juste avec le battement de l'horloge qui marque la fin de la seconde. Quand μ est arrêtée, tout le mouvement ne s'arrête pas : car les masses m ont une *vitesse acquise* en vertu de laquelle elles continuent à se mouvoir : seulement, la pesanteur n'agit plus pour changer leur mouvement; μ étant enlevée, la force accélératrice est enlevée, et le mouvement qui succède est un mouvement uniforme. Or, d'après ce que nous avons dit, la vitesse de ce mouvement uniforme est précisément celle du mouvement accéléré qui avait lieu à la fin de la première seconde, et pour la trouver il suffit de placer le curseur C de telle sorte que m vienne le frapper juste une seconde après que μ est ôtée, c'est-à-dire deux secondes après le départ de μ. Alors la distance des deux curseurs A et C est l'espace que m a parcouru en une seconde en vertu du mouvement uniforme; c'est donc la vitesse de ce mouvement et aussi la vitesse du mouvement accéléré. On fait une deuxième expérience en n'ôtant la masse μ qu'après deux secondes; on en fait une troisième en ne l'ôtant qu'après trois secondes, et l'on a ainsi la vitesse du mouvement accéléré après une, deux et trois secondes. On trouve exactement que ces vitesses sont entre elles comme 1, 2, 3; donc elles croissent proportionnellement au temps : donc le mouvement dont il s'agit est uniformément accéléré.

Soient g la vitesse due à la pesanteur après une seconde de temps, x la vitesse inconnue que prennent en une seconde les masses m et μ en tombant ensemble; l'équation

$$x = g \times \frac{\mu}{2m + \mu}$$

exprimera dans la machine d'Atwood la vitesse du corps qui tombe : elle est, comme on voit, toujours plus petite que g, et elle peut en être une fraction aussi petite qu'on voudra. Si l'on veut, par exemple, qu'elle en soit un centième, il suffit de poser

$$\frac{\mu}{2m+\mu} = \frac{1}{100}, \quad \text{d'où} \quad 100\mu = 2m + \mu, \quad \text{et} \quad \mu = \frac{m}{49,5},$$

c'est-à-dire qu'à chaque instant, la vitesse dans la machine d'Atwood est la centième partie de la vitesse due à la chute libre, quand la masse additionnelle est la 49,5[e] partie d'une des masses primitives; en prenant, par exemple, $\mu = 10$ grammes et $m = 495$ grammes, la condition sera remplie.

On conçoit qu'il y a un grand avantage à réduire ainsi la vitesse des corps qui tombent, puisqu'alors les espaces parcourus peuvent être mesurés plus exactement, et la résistance de l'air complétement négligée. Cette réduction de la vitesse est le vrai principe de la machine d'Atwood.

Ce résultat suffirait pour conclure que l'espace parcouru, en vertu du mouvement uniformément accéléré pendant un certain temps, est

moitié de l'espace parcouru dans le même temps par le mouvement uniforme qui lui succède. Mais on le voit directement; car, dans chacune des expériences précédentes, la distance des curseurs est double de la distance de l'anneau au point de départ.

On démontrerait aussi, par le moyen de la machine, que les espaces parcourus sont comme les carrés des temps.

Ces expériences s'accordent avec celle de Galilée pour prouver que la pesanteur qui s'exerce à la surface de la terre est une force accélératrice constante. Déjà la chute dans le vide a fait voir qu'elle s'exerce également sur toute espèce de corps. Ainsi, toutes les molécules matérielles, quelle que soit leur forme ou leur nature, sont constamment soumises à l'action de cette force.

D'après cela, les lois du mouvement qu'elle imprime sont exprimées par les formules générales du mouvement uniforme accéléré

$$v = gt,$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles il reste à mettre pour g la valeur qui convient à la pesanteur. On se rappelle que g représente la vitesse que la force accélératrice imprime au mobile pendant l'unité de temps, et l'on se rappelle aussi que cette vitesse est double de l'espace que la force fait parcourir pendant la même unité; ainsi g est un espace ou une longueur : en prenant la seconde pour unité de temps, la valeur de g est à Paris

$$g = 9,8058.$$

DU CENTRE DE GRAVITÉ. — DE L'ÉQUILIBRE DES SOLIDES. — DU POIDS, DE LA MASSE ET DE LA DENSITÉ DES CORPS. — DE LA BALANCE.

Un corps pesant peut être considéré comme un assemblage d'un nombre infini de points matériels, dont chacun est sollicité par la pesanteur; toutes ces forces, quoiqu'en nombre infini, pourraient être remplacées par une force unique, appliquée en un certain point : c'est cette force, qui ne serait autre chose que la résultante de toutes les actions de la pesanteur, que l'on appelle le *poids* d'un corps, et c'est le point où elle devrait être appliquée qu'on appelle son *centre de gravité.* Cette définition suffit pour qu'on ne confonde pas la pesanteur avec le poids, puisque la pesanteur est la force élémentaire qui sollicite chacune des parcelles, et que le poids d'un corps est la somme ou plutôt la résultante de toutes les actions que la pesanteur exerce sur ce corps en particulier.

Il est très-important de savoir déterminer le poids des corps et leur centre de gravité, puisqu'alors on pourra substituer le poids, qui est une seule force, à toutes les forces élémentaires qui agissent sur un corps, et le centre de gravité, qui est un seul point, à l'ensemble des points qui le constituent, et qu'ainsi une masse pesante, quelles que soient sa grandeur et sa forme, pourra être considérée comme un seul point sollicité par une seule force.

Du centre de gravité. — Dans un corps pesant, les actions que la pesanteur exerce sur chaque molécule peuvent être prises pour parallèles, puisqu'elles vont concourir au centre de la terre, et elles sont toutes égales, puisque ces molécules tombent également vite dans le vide; ainsi, le centre de gravité n'est autre chose qu'un centre de forces parallèles et égales. De là résulte une propriété caractéristique du centre de gravité, c'est que ce point est fixe dans l'intérieur des corps solides, et ne change pas, quelle que soit la position qu'on leur donne à l'égard de la pesanteur. Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il n'y a qu'une seule condition à remplir, c'est que le centre de gravité soit soutenu. Par conséquent, si le centre de gravité est lui-même un point fixe, on pourra tourner le corps de toutes les manières possibles, il restera toujours en repos, parce qu'il sera toujours en équilibre. C'est de cette considération que l'on tire un moyen expérimental de trouver le centre de gravité d'un corps. Nous ne reviendrons pas sur la détermination géométrique des centres de gravité; nous avons traité cette question dans notre *Manuel à l'usage des candidats aux emplois de Conducteur des Ponts et Chaussées et d'Agent voyer*, le *Manuel au grade d'Ingénieur* en est la suite naturelle.

De l'équilibre. — Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il faut que la direction de la verticale menée par le centre de gravité passe dans l'intérieur du polygone qui forme la base de ce corps. Plus la base du corps est petite, plus cette condition est difficile à obtenir; de là la difficulté de faire tenir une canne verticalement. Dans l'homme, le centre de gravité se trouve vers le milieu de la partie inférieure du bassin; pour qu'un homme soit en équilibre sur ses pieds, il faut que la direction de son centre de gravité passe par la base que la position de ses pieds détermine : un homme qui se tient debout verticalement est en équilibre, et il est d'autant plus ferme que la position de ses pieds détermine une plus large base. Un homme qui porte un fardeau sur son dos est obligé de se pencher en avant, parce que le fardeau et lui forment un seul système, dont le centre de gravité passerait au delà de sa base s'il se tenait verticalement. Un homme qui porte un fardeau dans ses bras, est obligé, par la même raison, de se pencher en arrière.

Variété matérielle des corps. — Il existe un petit nombre de corps dont on ne peut retirer qu'une seule sorte de matière; il en existe au contraire un grand nombre dont on peut retirer plusieurs matières de nature différente. Les premiers sont des corps simples, et les seconds sont des corps composés.

On dit que les corps se combinent lorsqu'ils agissent les uns sur les autres de manière à n'en plus former qu'un seul dont toutes les parties contiennent une certaine quantité de chacun d'eux. C'est ainsi qu'en faisant fondre dans un creuset 80 parties de plomb et 20 parties de soufre, on obtient un composé dans les plus petits fragments duquel on trouve du plomb et du soufre; c'est encore ainsi qu'en faisant fondre du sel dans l'eau, il en résulte une liqueur dont toutes les gouttes sont salées.

Il faut distinguer les molécules appartenant à chacun des corps

qui s'unissent de celles qui proviennent de cette union et qui forment masse par leur rapprochement ou leur agrégation. On appelle les premières *molécules constituantes*, et les autres *molécules intégrantes*. Les molécules intégrantes sont donc toutes de la même nature que le corps dont elles font partie; ce sont, à proprement parler, les particules de ce corps : aussi leur donne-t-on souvent ce nom. Les molécules constituantes sont, au contraire, de nature différente; il en existe autant de sortes dans un composé qu'il contient de corps divers. Tous les corps composés contiennent ces deux genres de molécules, tandis que les corps simples ne contiennent que des intégrantes.

Des forces. — Tous les corps ne se combinent pas les uns avec les autres, parce que différentes causes s'y opposent; mais tous tendent à se combiner. On ne peut expliquer cette tendance générale à la combinaison qu'en admettant l'existence d'une force inhérente aux molécules de la matière. Cette force, quelle qu'en soit la cause, a été appelée *attraction moléculaire :* elle n'a lieu qu'auprès du point de contact ou à des distances incommensurables; en effet, si la distance qui sépare deux corps est mesurable, leurs molécules ne s'attirent point; mais s'ils se touchent, ou s'ils sont en contact apparent, elles pourront s'attirer et s'unir. Cette attraction pourrait donc être différente de l'attraction planétaire, puisque celle-ci s'exerce entre les masses et à des distances considérables, et qu'elle agit toujours en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances.

L'attraction moléculaire prend différents noms, selon qu'elle a lieu entre des molécules de même nature ou des molécules de nature différente; elle s'appelle *cohésion* dans le premier, et *affinité* dans le second.

Cause du changement de l'état des corps. — Les corps sont, comme nous l'avons déjà dit, tantôt à l'état solide, tantôt à l'état liquide, et tantôt à l'état gazeux ou aériforme; cette manière d'être des corps dépend du rapport qui existe en eux entre la force de cohésion qui tend à unir leurs molécules intégrantes, et la force répulsive du calorique qui tend à les éloigner. Lorsque la première l'emporte sur la seconde, les corps sont solides; lorsqu'au contraire la seconde l'emporte sur la première, les corps sont liquides ou gazeux : liquides, si la cohésion est faible; gazeux, si la cohésion est nulle. Il suit de là que si l'on pouvait rendre ces deux forces alternativement prépondérantes, augmenter l'une et diminuer l'autre, ou bien, ce qui est la même chose, faire varier à volonté la distance qui sépare les molécules, on ferait passer tous les corps de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état gazeux. Réciproquement, on les ferait passer tous de l'état gazeux à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état solide. On les rendrait même beaucoup plus denses que ceux qui jouissent de la plus grande densité; mais notre puissance à cet égard est bornée, parce que nous ne pouvons produire qu'un degré limité de chaleur et de froid : c'est pourquoi il est des solides que nous n'avons pas encore fondus, des liquides que nous n'avons pas pu solidifier, et des gaz que nous n'avons pas pu liquéfier.

Pesanteur spécifique. — L'expérience nous apprend que sous des volumes égaux, les corps hétérogènes ont des poids inégaux; ainsi

une balle de plomb pèse plus qu'une balle de liége de même diamètre. C'est que, dit-on, dans le premier cas, les particules sont plus rapprochées que dans le second : cela est vrai pour les corps dont la composition est absolument la même, comme pour le sucre candi et le sucre en pain; mais rien ne prouve que la différence de poids qu'on observe entre des volumes égaux de deux corps, dont les compositions sont différentes, comme entre le plomb et le liége, tienne à la même cause. Quelle que soit donc la cause de cette différence, on est convenu, pour exprimer qu'un corps pèse plus qu'un autre sous le même volume, de dire que le premier est spécifiquement plus pesant que l'autre; c'est dans ce sens qu'il faut entendre que le plomb est plus pesant que l'eau, puisqu'il serait ridicule de dire qu'un kilogramme de plomb est plus pesant qu'un kilogramme d'eau.

Pour connaître la pesanteur spécifique des corps, il faut les réduire tous au même volume : il faut diviser le poids qu'on trouvera pour un volume quelconque par le nombre d'unités que le volume total renferme.

Supposons, par exemple, qu'on ait le projet de réduire tous les corps à 1 centimètre cube, et qu'on ne puisse le faire mécaniquement; on prendra un volume quelconque d'un corps, on le pèsera, on évaluera le nombre de centimètres cubes que le volume donné renferme; après quoi, divisant le poids total par le nombre d'unités de centimètres cubes qu'on aura trouvées, on aura le poids de 1 centimètre cube du corps.

Comparaison des pesanteurs spécifiques. — Pour pouvoir comparer entre elles les pesanteurs spécifiques des corps, il faut encore fixer une unité de cette espèce de grandeur. On est convenu de prendre pour cette *unité* la pesanteur spécifique de l'eau distillée, et l'on exprime la pesanteur spécifique d'un corps en disant qu'il pèse deux fois, trois fois, etc., un volume d'eau égal au sien, ou qu'il n'en pèse que la moitié, le tiers, le quart, etc., c'est-à-dire que la pesanteur spécifique d'un corps est le rapport entre le poids de l'eau et le poids de ce corps à volume égal. D'après cette manière d'exprimer la pesanteur spécifique, il n'est plus nécessaire de réduire tous les corps au même volume; il suffit que l'eau et le corps qu'on lui compare actuellement s'y trouvent réduits, puisque c'est tout ce qu'il faut pour évaluer ensuite le rapport entre leurs poids.

Réduire l'eau et un liquide quelconque au même volume. — Il est très-facile de réduire l'eau et un liquide quelconque au même volume : il suffit, pour cela, de choisir un flacon qui servira de mesure commune. On pèsera ce flacon plein d'eau, puis plein du liquide proposé, et l'on défalquera de chaque pesée le poids du verre; on aura ainsi deux poids dont on prendra le rapport par la proportion :

P (poids de l'eau) : P′ (poids du liquide) :: 1 (pesanteur spécifique de l'eau) : x (pesanteur spécifique du liquide); d'où

$$x = \frac{P'}{P}.$$

Réduire l'eau et les solides au même volume. — Pour réduire l'eau et les corps solides au même volume, on pèse d'abord le corps proposé;

puis on prend un flacon à large ouverture et bouché à l'émeri ; on le remplit entièrement, on le bouche et on l'essuie bien. On place ensuite ce flacon dans le plateau d'une balance très-courte avec le corps solide proposé, et l'on pèse le tout ; cela fait, on plonge le corps dans le flacon, il s'en échappe évidemment un volume d'eau égal à celui du corps ; on rebouche alors le flacon, on l'essuie bien, et l'on pèse de nouveau. Il est évident que la différence entre le poids actuel et le poids primitif est le poids du volume d'eau déplacé ; on a donc le poids de l'eau et le poids du corps à volume égal, et il ne s'agit plus que d'en prendre le rapport par la proportion citée ci-dessus. Soit un morceau de plomb du poids de 10 grammes et un flacon rempli d'eau : supposons qu'en pesant ensemble le flacon et le métal on trouve 25 grammes ; on plongera le métal dans le flacon, et après l'avoir bien rebouché et bien essuyé, on pèsera de nouveau ; alors on ne trouvera plus qu'environ $24^{gr},119$; d'où il résulte que le poids du volume d'eau échappé est égal à $0^{gr},881$. On a donc

$$P = 0^{gr},881, \quad P' = 10^{gr},$$

et la proportion $P : P' :: 1 : x$ devient

$$0^{gr},881 : 10^{gr} :: 1 : x;$$

d'où

$$x = \frac{10^{gr}}{0^{gr},881} = 11^{gr},35,$$

pesanteur spécifique du plomb.

Quand le corps est susceptible de s'imbiber d'eau, le volume d'eau échappé du flacon n'est pas égal au volume du corps ; il faut alors, après avoir pesé le corps, le plonger pendant quelques instants dans l'eau, puis le peser de nouveau pour déterminer l'augmentation de son poids ; on le replongera ensuite dans le flacon, et l'on continuera l'expérience comme précédemment, ayant soin d'ajouter dans le plateau où se trouvent les poids, un poids égal à celui dont le corps s'est accru par l'imbibition de l'eau.

Si l'on connaît le poids d'un volume d'eau, il sera facile, d'après des Tables de pesanteur spécifique, de déterminer le poids d'un égal volume d'un corps quelconque ; pour cela, on multipliera le poids du volume donné d'eau par la pesanteur spécifique du corps proposé : par exemple, si un volume donné d'eau pèse 29 kilogrammes, le même volume proposé de mercure pèsera 29 kilogrammes multipliés par 13,586, pesanteur spécifique du mercure.

Le décimètre cube d'eau ou litre pèse 1 kilogramme : il est facile de voir qu'un décimètre cube d'or pèse $19^{kil},258$; un décimètre cube de mercure pèse $13^{kil},586$.

Du poids, de la masse et de la densité. — Nous avons dit plus haut ce qu'on entend par le poids d'un corps. L'unité de poids qui a été adoptée en France est le gramme, qui est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée et ramenée au maximum de densité.

La masse d'un corps est la quantité de matière qui le compose ; mais cette définition serait incomplète si nous n'avions pas quelque moyen de comparer les quantités de matière et d'établir leur rapport. Tout le monde sait que dans l'espace d'un décimètre cube, on peut

faire entrer des quantités très-différentes du même corps, suivant le degré de compression qu'on lui donne. Il est probable, en effet, que tout l'air d'un appartement pourrait entrer dans un fusil à vent, si le réservoir était assez fort pour résister à la pression.

Ainsi la quantité de matière n'est pas proportionnelle au volume, mais l'expérience nous a appris *que la masse ou la quantité de matière est proportionnelle au poids.*

La densité d'un corps est égale au rapport de son poids à son volume : ce rapport est pour chaque substance une propriété permanente, et souvent même il devient une propriété caractéristique ; mais il est bien entendu qu'il faut prendre le volume à la même température, car la chaleur dilate tous les corps. Nous apprendrons plus tard à déterminer les densités; pour le moment, nous les supposerons connues, et nous apprendrons seulement à nous en servir.

Il résulte de la définition que nous en avons donnée :

1°. Qu'à volume égal les densités des corps sont proportionnelles à leurs poids;

2°. Qu'à poids égal les densités sont en raison inverse des volumes;

3°. Qu'en général les densités sont comme le rapport direct des poids multiplié par le rapport inverse des volumes;

4°. Que le poids d'un corps est égal à son volume multiplié par sa densité;

5°. Que le volume d'un corps est égal à son poids divisé par sa densité.

DU PENDULE.

Oscillations du pendule. — Le pendule ordinaire se compose d'une boule pesante suspendue à l'extrémité d'un fil flexible. Ses propriétés fondamentales sont : 1° de marquer la direction verticale ou celle de la pesanteur; 2° de faire des oscillations planes quand on l'écarte de la verticale et qu'on l'abandonne à lui-même sans lui donner aucune impulsion. En effet, si l'on met le pendule dans une position quelconque FA (*fig.* 2, *Pl. I*), et qu'on le laisse tomber librement, il descend jusqu'en L en décrivant l'arc de cercle LA avec un mouvement accéléré, puisque la pesanteur agit sur lui à chaque point; la vitesse augmente continuellement de A en L, et elle est à son plus haut degré en L, où la force accélératrice devient nulle : d'après cela, le corps ne peut demeurer en L, mais il continuera à décrire l'arc LA', en vertu de sa force d'inertie. On voit aisément que sa vitesse, maintenant que la pesanteur agit d'une manière contraire, doit décroître dans la même proportion suivant laquelle elle croissait auparavant, de sorte que, par exemple, il aura en K' la même vitesse qu'il avait au point K à une hauteur égale. Si l'on mène du point A, où commence le mouvement, la ligne horizontale AA', il est évident que le corps doit s'élever jusqu'en A'; mais en A' il se trouve dans le même cas où il était en A, il reviendra donc de A' jusqu'en A, et il continuera ainsi à osciller d'un de ses points à l'autre. Ces oscillations du pendule devraient continuer ainsi d'une manière égale et non interrompue, s'il ne se trouvait aucun obstacle au mouvement; mais la résistance de l'air et le frottement du point de suspension ôtent à

chaque instant au pendule quelque chose de sa vitesse : par cette raison, il n'atteint jamais la hauteur de l'oscillation précédente, et l'arc d'oscillation devient toujours plus petit, jusqu'à ce qu'enfin le pendule s'arrête tout à fait.

Le pendule est un des instruments les plus simples de la physique, et cependant il est un des plus curieux à étudier, parce qu'il sert à la mesure exacte du temps et à la détermination de la figure de la terre.

Lois des oscillations du pendule. — 1°. La durée des oscillations, qui sont très-petites, est indépendante de leur arc : on dit qu'elles sont *isochrones,* pour exprimer qu'elles se font toutes dans le même temps;

2°. La durée des oscillations est tout à fait indépendante du poids de la boule et de la nature de sa substance;

3°. Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules.

Ces lois se déduisent rigoureusement des principes de mécanique; mais, en physique, on les démontre approximativement par l'expérience.

Pour démontrer la première loi, il faudrait compter plusieurs centaines d'oscillations quand l'arc est de 4 ou 5 degrés; les autres un peu plus tard, quand elles sont réduites à 2 ou 3 degrés, et les dernières vers la fin du mouvement, quand elles ne sont plus sensibles à l'œil et qu'il faut les observer avec une lunette, et l'on verra que le pendule met autant de temps à parcourir un arc de $\frac{1}{10}$ de degré qu'à parcourir un arc de 10 degrés, qui est cependant cent fois plus grand.

La seconde se démontre en prenant différentes boules de métal; on en compose des pendules de même longueur, que l'on fait osciller ensemble, et l'on voit que tous ces pendules restent d'accord.

La troisième loi se démontre avec des pendules de diverses longueurs : si, par exemple, on prend trois pendules dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, alors les durées des oscillations doivent être comme les nombres 1, 2, 3; et, en effet, si l'on fait osciller de tels pendules, on compte facilement que celui dont la longueur est 1, comparé à celui dont la longueur est 4, fait deux oscillations pour une, et qu'il en fait trois pour une quand on le compare à celui dont la longueur est 9.

La durée absolue de chaque oscillation doit varier, tout le reste demeurant égal, lorsque la pesanteur varie; le temps doit être plus long si la pesanteur diminue, et plus court si elle augmente. En effet, si la pesanteur cessait d'agir à un instant donné, les corps cesseraient de tomber et les pendules d'osciller; au contraire, si la pesanteur venait à doubler d'intensité, les corps tomberaient plus vite et les pendules seraient plus prompts dans les retours de leurs battements.

Si à un fil inflexible et sans pesanteur (*fig.* 3, *Pl. I*) on attachait seulement deux molécules pesantes, on aurait un pendule composé. Dans cet appareil, la vitesse d'oscillation se compose; en effet, des vitesses d'oscillation que prendrait séparément chacune des petites masses en oscillant séparément. La molécule *l* tend à osciller plus vite que la molécule L, puisqu'elle est plus près du point de suspension; mais puisqu'elles sont liées l'une à l'autre, forcées de marcher ensemble, la première est retardée par la seconde, et la seconde accélérée par

la première : de là une vitesse intermédiaire qui est la vitesse du pendule composé. Dans tout corps qui oscille, il se fait une compensation analogue entre toutes les vitesses différentes que prendraient les diverses molécules, si chacune d'elles oscillait librement. Pour le faire mieux voir, prenons un pendule comme ceux qui servent de régulateurs aux horloges; soit F le point fixe (*fig.* 4), F*t* est ce qu'on appelle la tige, *ll'* la lentille. Le point *m* et ceux qui sont comme lui voisins de l'axe de suspension, marcheraient très-vite s'ils étaient seuls; au contraire, le point *p* ne marcherait que très-lentement : les premiers sont donc retardés par l'effort qu'ils font pour entraîner les derniers, et ceux-ci sont accélérés par l'impulsion qu'ils reçoivent. Donc, entre le point *m* et le point *p*, il y a un certain point *c* qui n'est, lui, ni retardé ni accéléré, et qui fait son oscillation exactement comme s'il était seul; ce point remarquable est appelé le *centre d'oscillation*, et la distance de ce centre d'oscillation au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule.*

On démontre en mécanique que l'intensité absolue de la pesanteur est égale au carré du rapport approché de la circonférence au diamètre, multiplié par la longueur du pendule et divisé par le carré du temps d'une oscillation. Pour avoir l'intensité de la pesanteur, il suffira donc de faire osciller un pendule, d'en mesurer la longueur, d'observer la durée d'une oscillation et de faire les calculs que nous venons d'indiquer. Borda et après lui Arago ont mesuré la longueur du pendule; à Paris, la longueur du pendule sexagésimal est de $993^{m},8267$; à Londres, la longueur du pendule sexagésimal est de $994^{m},1147$. On appelle *pendule sexagésimal* celui qui fait une oscillation en une seconde sexagésimale.

Ensuite, pour avoir la durée d'une oscillation, on a mis le pendule en mouvement à une heure fixe, on l'a laissé osciller pendant plusieurs heures, et l'on a observé l'instant précis où il a achevé sa dernière oscillation. Le temps qui s'est écoulé entre le commencement de la première oscillation et la fin de la dernière est le temps pendant lequel le pendule a marché : soit $4^{h}\,10^{m}$ ou 15000 secondes; si le pendule a fait pendant ce temps 20000 oscillations d'égale durée, on dira : En 15000 secondes il a fait 20000 oscillations, donc pour une seule oscillation il a employé $\frac{3}{4}$ de seconde.

Il résulte de ces calculs que l'intensité de la pesanteur est à Paris de $9^{m},809$, c'est-à-dire qu'un corps qui tombe dans le vide pendant une seconde acquiert une telle vitesse, que, si la pesanteur cessait d'agir sur lui, il parcourrait $9^{m},809$ dans toutes les secondes suivantes : ce qui veut dire qu'un corps qui se meut dans le vide, en partant du repos, parcourt en une seconde un espace qui est de 4,905; car nous avons vu que la vitesse qui a lieu après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité. On pourra déterminer l'intensité de la pesanteur en divers lieux de la terre; il faudra faire dans chacun de ces lieux ce qui a été fait à Paris.

Les observations du pendule peuvent servir à déterminer la figure de la terre. Il suffira, pour cela, de déterminer les longueurs du pendule à l'équateur et au pôle. On trouvera l'aplatissement au pôle en divisant l'excès de la longueur du pendule au pôle sur la longueur à

l'équateur, par la longueur du pendule à l'équateur, et retrancher ce quotient du nombre constant 0,00865, qui est les $\frac{5}{2}$ du quotient de la force centrifuge à l'équateur par la pesanteur. On peut même se dispenser d'aller au pôle, car la pesanteur décroissant suivant une certaine loi depuis le pôle jusqu'à l'équateur, il faut que les longueurs des pendules décroissent aussi suivant la même loi ; d'où il résulte une relation déterminée entre toutes les longueurs des pendules des diverses latitudes. Ainsi, au lieu d'observer le pendule au pôle et à l'équateur, on peut l'observer à deux latitudes quelconques, pourvu qu'elles soient assez éloignées l'une de l'autre.

DE LA BALANCE.

La balance se compose essentiellement d'un fléau dont les deux parties s'appellent les *bras de la balance*, et de deux pièces mobiles adaptées aux extrémités du fléau, que l'on appelle les *plateaux* ou les *bassins* (*fig.* 5, *Pl. I*). Le fléau est soutenu vers son milieu sur un pied solide, et il porte une aiguille perpendiculaire qui tombe au zéro de sa division quand le fléau est horizontal, et qui passe à gauche ou à droite, suivant que le fléau se relève lui-même à gauche ou à droite. On met dans l'un des bassins le corps que l'on veut peser et dans l'autre des poids marqués ; on en met jusqu'à ce que le fléau soit horizontal, ou du moins jusqu'à ce que l'aiguille fasse des oscillations égales de part et d'autre de son zéro. Alors la somme des poids est prise pour le poids du corps.

Pour qu'une balance soit bonne, il faut :

1°. Que le fléau n'éprouve sur ses supports que le moindre frottement possible, et cette condition se remplit de la manière suivante : *ee* est un prisme d'acier qui traverse le fléau F (*fig.* 5) et qui est taillé, comme on le voit, par sa section perpendiculaire, qui est représentée en S. L'arête *a* est un tranchant un peu arrondi, et c'est ce tranchant, qu'on appelle le *couteau*, qui porte toute la masse du fléau, de l'aiguille, des bassins et des poids qu'ils contiennent ; il repose sur deux pièces d'agate ou d'acier PP, qui sont incrustées dans le pied de la balance de manière que leurs surfaces ne forment qu'un même plan horizontal.

2°. Il faut que la distance du point d'attache des bassins au point de suspension du fléau soit très-exactement la même dans toutes les positions que prend l'appareil avant de s'arrêter à l'équilibre. On remplit cette condition en ajustant les pièces pour que les bassins ne touchent le fléau que comme le fléau lui-même touche ses appuis, c'est-à-dire par des arêtes légèrement arrondies, très-dures et très-polies ; *f* représente l'extrémité du fléau (*fig.* 6, *Pl. I*) ; *ee* est un petit prisme d'acier dont l'arête tranchante est en haut, comme on le voit par la section *s*, et *hh* sont deux crochets dont les courbures *rr* sont aussi taillées en couteau pour qu'en se posant sur l'arête *ee*, il n'y ait qu'un point de contact de chaque côté et que ce point reste le même dans toutes les oscillations du fléau.

3°. Enfin, il faut que le centre de gravité du fléau soit convenablement placé pour que l'équilibre soit stable et pour que les oscillations ne soient ni trop lentes ni trop rapides. Pour cela, il faut que le centre

de gravité soit placé au-dessous de l'axe de suspension. Quand le fléau penchera à droite, le centre de gravité sortira à gauche de la verticale du point de suspension; il tend à y revenir et y revient en effet par une suite d'oscillations dont la rapidité est plus ou moins grande.

Pour que le couteau ne fatigue pas les plans sur lesquels il repose, il y a deux fourchettes qui montent et qui descendent pour le soulever ou pour le mettre en place; quand on ne se sert pas de la balance, on lève les fourchettes par un mouvement de manivelle, et le fléau repose sur elles; quand on veut s'en servir, on abaisse les fourchettes, et le couteau vient reposer sur ses plans.

HYDROSTATIQUE.

Phénomènes capillaires ou adhésion des liquides aux différents corps. — Nous avons déjà dit que les corps solides sont susceptibles de contracter entre eux une adhérence plus ou moins forte. Cette propriété se manifeste également entre les corps solides et les liquides, et avec plus ou moins de force, suivant la nature de l'un et de l'autre. C'est en vertu de cette attraction mutuelle que les corps solides sont susceptibles d'être mouillés par différents liquides, et l'on sait que cette propriété varie d'un corps à l'autre : il y a des solides qui se laissent mouiller par tel ou tel liquide, et d'autres qui repoussent toute espèce d'adhésion. On doit considérer ces phénomènes comme le résultat d'une attraction des deux corps, modifiée par l'attraction mutuelle des particules liquides. Lorsque l'attraction des molécules liquides les unes pour les autres est plus petite que l'attraction qui existe entre ce liquide et le corps qu'on met en contact avec lui, ce corps en est mouillé; et lorsque, au contraire, elle est plus grande, ce corps reste sec.

Un très-grand nombre de corps solides sont, comme on sait, susceptibles d'être mouillés par l'eau, et c'est en vertu de leur action sur ce liquide que plusieurs d'entre eux attirent avec plus ou moins de force l'humidité de l'atmosphère. Tels sont, par exemple, le verre, qui est presque toujours humide à sa surface; le papier, les cordes à boyau, etc. Différents sels sont dans le même cas, et plusieurs d'entre eux ont une telle action sur l'humidité, que, suivant l'expression vulgaire, ils finissent par se réduire en eau, parce qu'ils se dissolvent petit à petit dans celle qu'ils attirent.

Il y a des corps qui sont très-difficilement mouillés par l'eau; tout le monde sait que les corps gras sont dans ce cas; mais il en est de même pour un grand nombre d'autres, et, par exemple, pour beaucoup de métaux polis. Une lame de rasoir bien polie qu'on plonge dans l'eau en sort presque toujours sèche; une lame d'argent, une lame d'or présentent les mêmes phénomènes; mais ces mêmes métaux, usés à la surface avec une lime grossière, se mouillent aussi facilement que d'autres corps; il semble alors que les aspérités dont ils sont couverts retiennent les particules liquides.

Les liqueurs spiritueuses et les huiles volatiles se conduisent à peu près comme l'eau; seulement ces dernières mouillent assez facilement

les corps gras. Les huiles grasses sont susceptibles de mouiller tous les corps, si ce n'est lorsqu'ils sont couverts d'humidité.

Il existe un grand nombre de corps qui ne peuvent être mouillés par le mercure; tels sont le verre, toutes les matières terreuses et pierreuses, le bois, le fer, l'acier, etc. Mais il en est d'autres sur lesquels ce liquide adhère avec une grande force; tels sont l'or, l'argent, l'étain, le plomb, le cuivre, etc. Si l'on plonge une lame de l'un de ces corps dans le mercure, on la retire toute blanchie par ce métal, qui y adhère très-fortement.

La force d'adhésion des corps solides avec les liquides se manifeste d'une manière positive lorsque, après avoir suspendu horizontalement une plaque de matière quelconque au plateau d'une balance, après avoir établi l'équilibre, on fait toucher exactement cette plaque à la surface d'un liquide : on voit alors qu'il existe une adhésion très-forte entre les deux corps, précisément comme on l'a déjà fait remarquer à l'égard des corps solides, et que, pour les séparer, il faut ajouter des poids plus ou moins forts dans le plateau opposé.

La résistance à la séparation varie suivant le plus ou moins de faculté avec laquelle le corps solide mis en expérience est mouillé par le liquide dont on se sert; il est à remarquer que ce n'est pas, à proprement parler, le corps solide qui se sépare du liquide, c'est une petite portion de ce même liquide que l'on sépare du reste de la masse et qui demeure adhérente au corps solide. Or on trouve par l'expérience que le poids qu'il faut employer pour opérer la séparation est beaucoup plus considérable que celui de la petite couche liquide qu'on entraîne, de sorte qu'on a une preuve directe de la force avec laquelle les particules liquides adhèrent entre elles; cette force est égale à l'excès du poids employé pour vaincre l'adhésion sur celui de la portion de liquide qui est restée à la surface du corps solide. Elle représente la cohésion, ou, si l'on veut, la ténacité du liquide.

Ascension ou abaissement des liquides autour des corps qui y sont plongés. — Lorsqu'on plonge dans un liquide un corps susceptible d'en être mouillé, ce liquide s'élève autour de lui au-dessus de son niveau en décrivant une courbe concave (*fig.* 7, *Pl. I*); c'est ce qui arrive lorsqu'on plonge une lame de verre dans l'eau, une lame d'or ou d'argent dans le mercure. Lorsque le corps plongé n'est pas susceptible d'être mouillé par le liquide, celui-ci s'abaisse autour de lui en décrivant une courbe convexe (*fig.* 8, *Pl. I*); c'est ce qui a lieu quand on plonge une lame de verre dans le mercure. Il y a des corps autour desquels le liquide conserve sensiblement son niveau : cela arrive toutes les fois que l'attraction des particules liquides entre elles est égale à l'attraction mutuelle de ce liquide et du corps qu'on y plonge. En mettant dans l'eau une lame d'acier polie, le liquide conserve son niveau; en plongeant dans du mercure bien privé d'humidité une lame de verre bien desséchée, on voit de même le liquide conserver son niveau autour d'elle. Si l'on plonge dans l'eau deux lames de verre, placées vis-à-vis l'une de l'autre et assez rapprochées pour que les branches des courbes puissent se joindre (*fig.* 9, *Pl. I*), comme il se forme une surface concave entre les deux lames, l'eau s'élève à l'instant entre elles au-dessus du niveau où elle se trouve à l'extérieur, et

d'autant plus que les lames sont plus rapprochées. Si l'on plonge ces deux lames dans le mercure, il se forme entre elles une surface convexe (*fig.* 10, *Pl. I*), et le liquide se tient à l'intérieur beaucoup au-dessous du point où il se trouve à l'extérieur. Si l'on substitue un tube aux lames de verre, les mêmes effets ont lieu : l'eau s'élève dans l'intérieur au-dessus de son niveau d'une quantité d'autant plus considérable que le tube est plus étroit ; au contraire, le mercure s'y abaisse. Ce sont là les phénomènes des tubes capillaires ; ils ont lieu aussi dans les tubes beaucoup plus grands, mais ils sont plus sensibles dans les tubes étroits.

Causes qui déterminent l'ascension ou l'abaissement des liquides dans les tubes. — En vertu de l'attraction moléculaire, les particules de la surface d'un corps tendent à rentrer dans son intérieur. Un corps terminé par une surface courbe exerce sur les molécules de sa surface une action différente de celle du plan. Cette action est moins forte si la surface est concave ; elle est plus forte si elle est convexe. On peut rendre sensibles, par expérience, ces différences d'action du liquide suivant la forme de sa surface : qu'on prenne un tube recourbé, qu'on y introduise de l'eau, on verra le liquide se mettre au niveau dans les deux branches et être terminé de part et d'autre par une surface concave ; mais qu'on enduise une des branches d'une légère couche de graisse, on verra le liquide dans la branche graisseuse se terminer par une surface convexe, et dans l'autre par une surface concave ; on remarquera que, dans celle-ci, le liquide s'élèvera considérablement au-dessus de son niveau dans la première branche : il faut donc que, dans cette première branche, l'action qui tend à pousser les molécules dans l'intérieur soit plus forte que dans la seconde. Ces résultats font connaître la cause des phénomènes. En effet, lorsque l'attraction mutuelle des molécules du liquide est plus faible que l'attraction des corps qui y sont plongés, le liquide est attiré jusqu'à une très-petite distance au-dessus de son niveau, ce qui détermine auprès du corps une petite surface concave ; il en résulte que le liquide se trouve sollicité auprès du corps par une force moindre que celle qui agit sur la surface plane située plus loin ; par conséquent, le liquide doit s'élever jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. Lorsque deux corps sont assez rapprochés l'un de l'autre pour que les surfaces courbes se croisent, il se forme une surface dont la concavité est encore plus profonde ; il faut donc que le liquide s'élève plus haut entre les deux corps qu'à l'extérieur, et cela jusqu'à ce que la colonne élevée fasse équilibre par son poids à la différence d'action des surfaces.

Lorsque l'attraction mutuelle des molécules du liquide est plus forte que l'attraction des corps qui y sont plongés, il se forme entre les deux lames une surface convexe ; il en résulte que le liquide y est sollicité par une force plus grande que celle qui a lieu à la surface plane extérieure ; il faut donc que le liquide s'abaisse entre ces lames pour que l'équilibre ait lieu. L'ascension des liquides dans l'intérieur des corps s'explique par l'action capillaire. C'est ainsi qu'un morceau de sucre qu'on plonge par un coin dans le café se trouve en un instant humecté dans tous ses points. C'est par l'action capillaire que l'huile s'élève dans les mèches de nos lampes.

PRESSION DES LIQUIDES.

Équilibre des liquides. — Le caractère essentiel des corps liquides est la parfaite mobilité de leurs particules. Ce caractère, joint à l'impénétrabilité, conduit au principe de pression en tous sens qui sert de base à toute l'hydrostatique. En effet, si une masse liquide se trouve en équilibre, il faut que les particules, d'après leur extrême mobilité, soient également pressées de toutes parts; car si elles étaient plus pressées d'un côté que de l'autre, elles se mouvraient nécessairement du côté de la plus grande force : on tire de ce principe l'explication de tous les phénomènes que présente l'équilibre des corps liquides.

Pression des liquides sur les parois des vases qui les renferment. — Un corps solide non ductile, une masse de verre par exemple, enfermé dans un vase cylindrique dont il touche les parois latérales sans y exercer de frottement sensible, ne pèse que sur le fond du vase, quelque pression qu'on exerce à sa surface supérieure, parce que les particules sont très-fortement unies entre elles et ne peuvent glisser les unes sur les autres.

Un corps ductile comme le plomb, l'étain, la graisse, etc., qu'on renferme dans le même vase, ne presse encore que sur le fond lorsqu'il est sollicité seulement par la gravité; mais si l'on ajoute à sa partie supérieure une force capable de vaincre la cohésion des particules, on reconnaît que l'action s'exerce aussi sur les parois latérales et même sur les parois supérieures; car s'il se trouve une ouverture en quelque endroit que ce soit, le corps s'échappe par elle en filaments.

Les graisses, dont les particules sont déjà extrêmement mobiles, s'affaissent même d'une certaine quantité sous leur propre poids; mais ce sont surtout les liquides qui présentent cette propriété d'une manière remarquable. On sait, en effet, qu'il ne serait pas possible d'élever une colonne liquide sans qu'elle s'écoulât sous son propre poids, parce que dans ces corps les molécules glissent les unes sur les autres avec la plus grande facilité. Il résulte de ce que nous venons de dire que, si un corps liquide est renfermé dans un vase, non-seulement il presse dans le sens de la gravité, mais encore dans un sens perpendiculaire à la direction de cette force, c'est-à-dire horizontalement.

Outre ces deux pressions, les liquides en exercent aussi une autre de bas en haut lorsqu'ils sont placés convenablement. Pour concevoir comment cela peut avoir lieu, remarquons que les liquides sont impénétrables, et que, d'après cela, quand on y plonge un corps, leur niveau s'élève d'une quantité proportionnelle au volume de ce corps. Si, dans ce cas, le liquide est enfermé de manière à ce qu'il ne puisse pas s'élever, il est évident qu'il exerce un effort considérable sur l'obstacle qui lui est opposé; c'est précisément ce qui a lieu dans le vase *abcd* (*fig.* 11, *Pl. I*). La colonne liquide *fg* tend, par son poids, à rentrer dans la partie *abcd*, mais la paroi *ab* s'oppose à l'élévation du liquide, et il en résulte que ces différents points doivent subir de bas en haut une certaine pression.

En général, les liquides enfermés dans des vases exercent leur pression dans toutes les directions.

Pression sur la paroi horizontale inférieure. — Les différents points de la paroi horizontale inférieure d'un vase ne sont pressés qu'en raison de leur surface et de la hauteur perpendiculaire du liquide au-dessus d'eux. Ainsi, dans le vase cylindrique *abcd*, la partie *ab* du fond ne supporte que le poids de la colonne *abcd* (*fig.* 12, *Pl. I*), ce qui est évident par soi-même et ce qu'on peut prouver par expérience. Il suffit, pour cela, d'enlever cette partie *ab* et de disposer à sa place une petite plaque qui ferme exactement l'ouverture circulaire. On soutient cette plaque par le moyen d'un cordon attaché à son centre et qui s'accroche au levier d'une balance. Connaissant le diamètre de l'ouverture et la hauteur du liquide, on calculera le volume de la colonne, et l'on aura son poids si l'on sait combien pèse le décimètre cube du liquide employé. On verra dès lors que, pour maintenir la plaque lorsqu'elle est chargée du liquide, il suffit de mettre dans le plateau de la balance un poids égal à celui qu'on a trouvé, en supposant cependant que le poids de la plaque fait équilibre au plateau de la balance. Le fond *ab* du cylindre supporte donc évidemment le poids total du liquide.

Pression dont les parois latérales sont inclinées du dedans au dehors. — Dans un vase dont les parois latérales sont inclinées du dedans au dehors (*fig.* 13, *Pl. I*), le fond supporte le poids d'une colonne dont *ab* serait la base et *ad* la hauteur. C'est ce qu'on peut vérifier en rendant le fond mobile et en le soutenant par son centre au moyen d'un cordon accroché au levier d'une balance, comme dans l'expérience précédente.

Pression dont les parois latérales sont inclinées du dehors au dedans. — Dans un vase dont les parois sont inclinées du dehors au dedans, le niveau du liquide étant en *e* (*fig.* 14, *Pl. I*), le fond *ab* supportera la même pression que s'il se trouvait au-dessus de lui une colonne *abdf*. C'est ce qu'on prouve par des expériences semblables à celles que nous avons faites ci-dessus, et voici comment on peut le concevoir : Supposons un vase formé de la réunion de plusieurs tubes ; il est évident que le fond *ab* (*fig.* 15, *Pl. I*) supportera le poids d'une colonne *abd*, que le fond *cf* supportera la colonne *cfg*, et que le fond *hi* supportera la colonne *hik*, etc. On peut se figurer de semblables tubes dans le vase proposé ; chaque partie du fond où aboutirait un tube supporterait le poids d'une colonne dont la hauteur serait déterminée par le niveau du liquide. La pression que supporterait la base totale serait la somme de toutes les pressions particulières, et cette somme représente la colonne *abdf*. Ce résultat est pleinement confirmé par l'expérience. On trouve que, pour soutenir le fond *ab* appliqué contre l'ouverture, il faut employer un contre-poids précisément égal au poids de la colonne *abdf*, qu'on détermine par le calcul.

On voit, par cette expérience, qu'avec une très-petite quantité d'eau, on peut produire un effort aussi considérable qu'on voudra, en disposant au-dessus d'une base très-large un tuyau très-long et très-étroit qu'on remplit de liquide.

Presse hydraulique. — C'est sur le principe qui vient d'être énoncé qu'est basée la presse hydraulique, dont les effets sont si prodigieux

et dont on se sert dans divers ateliers pour les opérations qui exigent de très-grands efforts. Le résultat auquel nous venons de parvenir est nommé *paradoxe hydrostatique*.

Pression sur la paroi horizontale supérieure. — Les différentes parties de la paroi horizontale supérieure sont pressées de bas en haut en raison de leur surface et de la hauteur du liquide qui peut se trouver au-dessous. Si l'on fait en *h* (*fig.* 16, *Pl. I*) une petite ouverture, et qu'on y place un petit tube vertical *hi*, la résistance de la paroi étant détruite en cet endroit, le liquide peut s'échapper; il s'élève dans le tube jusqu'à ce que sa surface se trouve de niveau avec celle du liquide dans la colonne *fg*. Cet établissement de niveau porte à cette conclusion, que l'ouverture *h* est pressée de haut en bas avec la même force que de bas en haut; car il est évident que, pour que deux forces opposées se détruisent, il faut qu'elles soient égales; donc la pression que supporte de bas en haut chaque partie de la paroi horizontale *ab* est égale au poids d'une colonne liquide dont elle serait la base et dont la hauteur serait celle de la colonne *fg*. Le tube *hi* peut être droit ou incliné comme *hk* sous tous les angles possibles; le niveau s'établit toujours.

Pression dans toutes les directions. — On peut dire, en général, que les liquides pressent dans toutes sortes de directions; mais les pressions de haut en bas, de bas en haut et horizontales sont les principales : toutes les autres peuvent être regardées comme le résultat des actions simultanées de celles-ci.

Ainsi, lorsque, sur le dernier vase (*fig.* 16), le tube *hi* est vertical, c'est la pression de bas en haut qui agit seule pour élever le liquide jusqu'au niveau de ce qui reste dans la colonne *fg*; mais lorsque le tube *hk* est incliné, la pression de bas en haut se combine avec la pression horizontale pour produire cet effet. La même chose a lieu dans les vases qui communiquent d'une manière quelconque avec des tubes de figure quelconque ou avec d'autres vases; dans tous les cas le niveau s'établit, quels que soient la forme des tubes, leur inclinaison sur le vase principal et leurs contours.

Propriété des liquides de tendre toujours au niveau. — La propriété des liquides de tendre toujours au niveau dans les vases communicants est très-importante pour la conduite des eaux; ainsi, pour conduire les eaux d'une montagne sur une autre qui en est séparée par une vallée, il faut établir sur la seconde montagne un réservoir de la source et disposer des tuyaux de communication. C'est par ce moyen qu'on distribue l'eau dans les différents quartiers des grandes villes par des tuyaux cachés sous le pavé des rues et qui partent d'un réservoir situé à une certaine hauteur. On peut aussi élever l'eau aux différents étages d'une maison, pourvu que ces étages ne soient pas au-dessus du réservoir. Les fontaines, les jets d'eau, etc., sont produits de la même manière.

Les sources qui se trouvent dans des endroits très-élevés, et autour desquelles on n'en voit pas qui le soient sensiblement plus, peuvent être produites par des crevasses qui communiquent d'une montagne à une autre, et à la faveur desquelles ce liquide tend à se mettre de niveau.

Les sources jaillissantes naturelles sont des phénomènes semblables à nos jets d'eau; elles ont lieu toutes les fois qu'il existe un bassin supérieur d'où l'eau peut s'écouler par des conduits naturels; dans certains endroits, il suffit de percer dans la terre un trou avec une sonde pour se procurer une source jaillissante : c'est un moyen de se procurer de l'eau dans plusieurs parties de la France.

Dans tout ce que nous avons dit jusqu'ici, nous avons supposé les vases remplis d'un seul liquide; la pression que supporte alors un point quelconque de la paroi dépend de la densité du liquide et de sa hauteur; mais il peut arriver que des liquides de pesanteurs spécifiques différentes, comme du mercure, de l'eau, de l'huile, de l'esprit-de-vin, etc., se trouvent enfermés dans le même vase, où chacun occupera une place dépendant de son plus ou moins de pesanteur spécifique comparativement aux autres liquides. Dans ce cas, pour estimer la pression en un point donné, il faudra estimer la hauteur de chaque couche différente, calculer les poids des diverses portions de ces couches qui peuvent presser sur la paroi proposée, et ajouter ces poids pour avoir la pression totale.

Tant que les volumes liquides, qui se font équilibre dans des vases communicants, sont de même nature, ils sont nécessairement de même hauteur; mais si la matière liquide contenue dans un des vases est plus légère ou plus lourde que celle qui est contenue dans l'autre, les hauteurs seront différentes et en raison inverse des pesanteurs spécifiques. C'est ainsi qu'un volume d'eau qui ferait équilibre à une colonne de mercure, serait environ quatorze fois plus haute qu'elle. C'est aussi ce que nous voyons dans nos baromètres, où une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur fait équilibre à une colonne d'air dont la hauteur est de 53 000 mètres.

Principe d'Archimède. — Pression des liquides sur les corps qui y sont plongés. — Les corps solides perdent une partie de leur poids par leur immersion dans un liquide. Concevons au milieu de la masse liquide un parallélipipède *ag* (*fig.* 17, *Pl. I*), assez lourd pour descendre dans le liquide, et examinons les divers effets qui peuvent résulter de la pression qu'il supporte dans différents sens. La face latérale *abdc* est pressée par une colonne liquide dont elle est la base et dont la hauteur est déterminée par la distance de son centre au niveau; la face opposée *fghi* subit une pression égale, mais en sens contraire, de sorte que ces deux pressions se détruisent et qu'il n'en peut résulter aucun mouvement de translation : on fera le même raisonnement pour les deux autres faces *cdgi* et *abfh*.

La face supérieure *bdfh* supporte la pression de la colonne liquide dont elle est la base et dont *mn* est la hauteur.

La face inférieure *achi* est pressée de bas en haut par la colonne liquide dont elle est la base et dont la hauteur est *pn*. Cette pression tend à soulever le corps; mais si l'on en retranche la pression de la base supérieure qui tend à le faire descendre, il ne restera plus de bas en haut qu'une pression déterminée par une colonne liquide dont *achi* est la base et dont $pm = ab$ est la hauteur. C'est précisément le volume du parallélipipède. Donc le corps solide est sollicité de bas en haut par un effort égal au poids du volume liquide qu'il déplace,

donc il doit perdre une partie de son poids égale au poids du volume liquide déplacé.

Pour prouver par expérience la vérité de cette conclusion, qu'on prenne 1 décimètre cube d'étain pur, on trouvera que, dans l'air, il pèse 7 kilogrammes; mais si on le plonge dans l'eau, après l'avoir accroché au fléau d'une balance, et qu'on le pèse alors, on trouvera que son poids n'est plus que de 6 kilogrammes; il a donc perdu 1 kilogramme, et c'est précisément le poids du décimètre cube d'eau qu'il déplace.

Si, au lieu de peser le corps dans l'eau, on le pèse dans l'esprit-de-vin, il ne perdra plus 1 kilogramme, parce que le décimètre cube d'esprit-de-vin ne pèse que $0^{kil},837$.

D'après ces expériences, il est plus facile de soulever un corps plongé dans l'eau que lorsqu'il est simplement dans l'air: c'est que dans l'eau ce corps perd de son poids ce que pèse le volume d'eau qu'il déplace; en tirant un seau d'eau, par exemple, tout le monde sait que lorsque le seau est submergé, on le soulève avec la plus grande facilité, et qu'on ne commence à sentir son poids que quand il sort de l'eau.

C'est sur la connaissance de ce phénomène, que les corps solides plongés dans le liquide y perdent une partie de leur poids égale au poids du volume liquide qu'ils déplacent, qu'est fondée la méthode de déterminer les pesanteurs spécifiques d'un corps, que nous avons déjà démontrée.

Après avoir pesé un corps dans l'air, on le pèse dans l'eau; la différence entre le premier poids et le second est le poids du volume liquide déplacé; or ce volume liquide est égal au volume du corps; on a donc le poids de l'eau et le poids du corps sous le même volume; par conséquent on peut établir la proportion :

$$P : P' :: 1 : x.$$

(poids de l'eau) : (poids du corps) :: (pes. de l'eau) : (pes. sp. du corps.)

Corps flottants. — Un corps flottant déplace un volume liquide dont le poids est égal au sien. Nous avons supposé précédemment que le corps solide était plus pesant que le liquide dans lequel il était plongé; il nous reste à voir ce qui arrive lorsqu'il est plus léger. Lorsque le corps solide est plus lourd que le volume du liquide qu'il déplace, il tombe au fond en vertu de l'excédant de son poids; si, au contraire, il est plus léger, il doit être porté à la partie supérieure en vertu de l'excédant de la pression de bas en haut sur celle de haut en bas. Cette pression doit le forcer à sortir en partie du liquide; mais à l'instant où il commence à en sortir, la quantité du liquide déplacé diminue, et par conséquent aussi la force d'ascension, de sorte qu'il arrive un moment où le volume de liquide déplacé est tel, que son poids fait équilibre à celui du corps, et à ce point le corps, sollicité de bas en haut, comme il l'est de haut en bas, doit nécessairement flotter.

Pour prouver par expérience qu'un corps solide qui flotte à la surface d'un liquide déplace un volume de ce liquide dont le poids est égal au sien, on peut prendre un vase assez large pour admettre intérieurement une boule de cire de la grosseur de deux poings. Ce vase

est percé d'un trou auquel est adapté un petit tube; on y verse de l'eau jusqu'à ce que le liquide déborde par le tube et qu'il s'établisse un niveau. Cela fait, qu'on place à la surface de l'eau la boule de cire que nous venons d'indiquer; cette boule, s'enfonçant en partie, déplacera un volume de liquide qui s'échappera par le tube, et qu'on recueillera dans une bouteille disposée à cet effet. En pesant la quantité d'eau qui s'est échappée, on verra que son poids est précisément égal à celui du corps flottant. On peut faire l'expérience avec tout autre liquide, et l'on parviendra au même résultat. On peut conclure actuellement que plus le liquide est dense, ou plus le corps est léger, moins le volume déplacé est grand; par conséquent, le corps flottant s'enfonce d'autant moins que le liquide sur lequel il nage est plus dense comparativement à lui.

Tous les corps qui, sous un volume déterminé, pèsent moins qu'un pareil volume de tel ou tel liquide, peuvent flotter à la surface de ce liquide. Le fer, le cuivre, le marbre, le verre, etc., étant spécifiquement plus légers que le mercure, peuvent flotter sur ce liquide; tous les corps qui sont spécifiquement plus légers que l'eau, comme le bois, le liége, la cire, etc., peuvent flotter à la surface de ce liquide. Il peut arriver qu'un corps, après avoir flotté à la surface de l'eau, s'y enfonce ensuite : c'est parce que ce corps imbibe le liquide.

L'esprit-de-vin étant spécifiquement très-léger, il y a très-peu de corps qui puissent flotter sur lui.

Comme les liquides varient de densité par les changements de température, il peut arriver qu'un corps qui flotte sur un liquide à une basse température, ne puisse plus y flotter lorsque la température est plus élevée. C'est ce qui a lieu à l'égard d'un morceau de bois qui flotte dans l'eau froide et plonge dans l'eau bouillante.

Lorsque l'eau tient un sel en dissolution, sa densité est augmentée, de sorte que beaucoup de corps qui ne flottent pas sur l'eau pure, peuvent flotter sur l'eau salée. Un œuf, par exemple, flotte sur une solution de sel et plonge dans l'eau douce. Par la même raison, un bâtiment chargé fortement peut voguer en sûreté sur la mer, et être submergé lorsqu'il vient ensuite à entrer dans une rivière; cet accident est arrivé quelquefois.

On peut aussi faire flotter tous les corps, quelque lourds qu'ils puissent être, à la surface de tous les liquides, en leur donnant une forme telle, qu'avec peu de poids ils puissent présenter un grand volume. En effet, une plaque métallique ne pourrait flotter à la surface de l'eau; mais si on lui donne une forme concave, le volume liquide déplacé sera plus considérable et pourra être capable de la soutenir; c'est ainsi que la plupart des vases dont nous nous servons flottent avec facilité à la surface de l'eau.

Des aréomètres. — Les aréomètres sont des corps flottants qui donnent immédiatement les densités des liquides dans lesquels ils s'enfoncent. Il y a deux sortes d'aréomètres : les aréomètres à poids variable et les aréomètres à volume variable.

L'aréomètre à poids variable est un instrument que l'on fait en verre et quelquefois en fer-blanc; V est le corps de l'instrument (*fig.* 18, *Pl. I*); L est le lest, c'est-à-dire une petite masse de plomb que l'on

ajuste à la partie inférieure; *t* est la tige, qui doit être très-déliée; enfin, *c* est le chapeau sur lequel on doit mettre les poids. Quand l'instrument est plongé dans un liquide, il subit la loi des corps flottants; il se tient debout à cause du lest qui rabaisse son centre de gravité, et il s'enfonce jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre son poids et le poids du liquide qu'il déplace : alors on ajoute des poids sur le chapeau pour affleurer l'instrument, c'est-à-dire pour qu'un petit trait *f* marqué sur la tige se trouve exactement à fleur d'eau. Dans les différents liquides, il faut des poids différents pour produire l'affleurement, et c'est pour cela qu'on l'appelle *aréomètre à poids variable*. Soit P le poids de l'instrument; soient P′ les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'eau; soient P″ les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'alcool: la densité de l'alcool sera à la densité de l'eau comme $P + P'' : P + P'$.

L'aréomètre est d'autant plus sensible que le volume plongé est plus considérable et que la tige est plus fine.

Pour éviter les calculs, on forme pour chaque instrument une Table particulière où l'on trouve immédiatement la densité à côté du poids additionnel.

L'aréomètre à volume variable est généralement d'un volume moindre que le précédent; sa tige (*fig.* 19, *Pl. I*) est un petit tube de verre creux; le corps de l'instrument est une boule soufflée à l'extrémité du tube, et le lest se loge dans le petit appendice en verre qui est au-dessous de la boule; une bande de papier est soigneusement fixée dans l'intérieur de la tige pour porter les divisions qui marquent les densités. Le poids de cet aréomètre étant constant, il en résulte que les densités des liquides dans lesquels il s'enfonce sont entre elles en raison inverse des volumes plongés. C'est d'après ce principe qu'on fait les graduations, et l'on écrit sur la bande de papier qui sert d'échelle les nombres qui expriment directement les densités des liquides. Ainsi, quand l'aréomètre n'enfonce que jusqu'au nombre 800, la densité est 800; s'il s'enfonce jusqu'à 700, la densité est 700, etc.; la densité de l'eau est représentée par 1000.

Pèse-liqueurs. — Les pèse-liqueurs sont des espèces d'aréomètres qui ne sont pas gradués pour donner les densités des liqueurs dans lesquelles on les plonge, mais seulement pour donner leur degré de concentration. Les acides sont étendus d'une quantité d'eau plus ou moins grande; les dissolutions salines sont plus ou moins saturées; les eaux-de-vie sont plus ou moins riches en alcool, et l'on a fait des pèse-acides, des pèse-sels, des pèse-esprits, pour reconnaître immédiatement les différents états dans lesquels ces liquides peuvent se présenter.

Pèse-acides ou aréomètre de Beaumé. — Cet aréomètre a toute l'apparence d'un aréomètre à volume variable; mais il en diffère par sa graduation. Au point où il s'arrête dans l'eau pure, on marque 0; au point où il s'arrête dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 parties de sel ordinaire, on marque 15; on divise l'intervalle en quinze parties égales, et l'on continue les divisions au-dessous. Deux dissolutions saturées à divers degrés marqueront évidemment des degrés différents sur l'aréomètre; la plus saturée marquera des degrés plus élevés, mais on n'en pourra rien conclure directement, ni sur

les densités réelles de ces dissolutions, ni sur les quantités de sel qu'elles contiennent.

Les *pèse-sels* et les *pèse esprits*, qui sont gradués d'après des principes analogues, sont donc, comme le pèse-acide, des instruments de commerce plutôt que des instruments de physique.

Aréomètre de Nichelson ou de Fahrenheit. — L'aréomètre de Nichelson ou de Fahrenheit est un aréomètre à volume constant (*fig.* 18). Entre le corps V de l'instrument et le lest L se trouve un petit seau d'argent destiné à recevoir les fragments de matière dont on cherche la densité; cet aréomètre sert à déterminer les densités des corps solides. Quand les corps sont plus pesants que l'eau, ils doivent exercer une pression de haut en bas, et le panier est accroché par l'anse, comme on le voit dans la *fig.* 18, afin de recevoir cette pression; quand les corps sont spécifiquement plus légers que l'eau, ils doivent exercer une pression de bas en haut, et alors on retourne le panier et on l'accroche par le fond, afin qu'il reçoive encore cette pression.

Pour trouver une densité par ce moyen, il faut avant tout connaître le poids additionnel qui doit être mis sur le chapeau pour affleurer l'instrument dans l'eau distillée, c'est-à-dire pour le faire enfoncer jusqu'au trait *f* que porte la tige. Supposons qu'à la température zéro le poids additionnel soit de 25 grammes, et, avec cette donnée, cherchons la densité d'un diamant, par exemple. On met le diamant sur le chapeau, et l'on ajoute successivement des poids jusqu'à produire l'affleurement : soit $23^{gr},8$ ce qu'il faut ajouter; ces poids et le diamant équivalent ensemble à 25 grammes, puisque l'affleurement a lieu; donc le diamant pèse 25 grammes moins $23^{gr},8 = 1^{gr},2$; tel est son poids dans l'air. Alors on met le diamant dans le seau d'argent, et aux $23^{gr},8$ qui sont restés sur le chapeau, on ajoute ce qui est nécessaire pour l'affleurement : $0^{gr},34$ suffisent pour cet effet, donc $0^{gr},34$ représentent le poids que le diamant perd dans l'eau, et par conséquent le poids d'eau qu'il déplace, ou le poids d'un volume d'eau qui est égal au sien. Or, à volume égal, les densités sont entre elles comme les poids : donc la densité du diamant est $\frac{1,20}{0,34} = 3,53$.

Pour les corps plus légers que l'eau, il n'y a rien à changer, ni dans les raisonnements, ni dans les calculs; seulement, il faudra retourner le petit seau en argent et l'accrocher par le fond.

DES GAZ. — DE L'ÉQUILIBRE DES GAZ ET DES PRESSIONS ATMOSPHÉRIQUES.

On appelle *atmosphère* cette grande masse d'air qui est répandue tout autour de la terre et dont les tranches superposées s'élèvent plus haut que les plus hautes montagnes; la couche atmosphérique s'élève à une hauteur de douze à quatorze lieues.

On appelle *corps gazeux* ou *fluides élastiques* des corps qui sont différents de l'air par leur nature, mais qui sont analogues à l'air par leur transparence, par leur fluidité et par l'ensemble de leurs propriétés physiques.

Les gaz sont soumis à deux espèces de forces comme les solides et les liquides : à la force de la pesanteur et aux forces moléculaires.

La pesanteur de l'air peut se démontrer par l'expérience suivante. On fait le vide dans un ballon avec une machine pneumatique; on suspend ce ballon à l'un des bras de la balance, et, de l'autre côté, on met des poids dans le plateau pour faire équilibre. Si, après cela, on ouvre le ballon pour y laisser entrer un peu d'air, l'équilibre est rompu, et il faut ajouter de nouveaux poids dans le plateau, si on l'ouvre encore, il arrive encore une augmentation de poids; enfin, si on laisse entrer l'air complétement, on voit qu'il a fallu ajouter une somme de poids très-sensible.

Pour un ballon d'une contenance de 10 litres, la différence des poids est de plus de 10 grammes, ce qui prouve que 1 litre d'air pèse environ 1 gramme, c'est-à-dire que l'eau est environ mille fois plus pesante que l'air.

Les forces moléculaires agissent dans les gaz d'une tout autre manière que dans les solides et les liquides. Dans ces derniers, la force moléculaire attire les molécules les unes vers les autres et les retient unies; au contraire, dans les gaz, la force moléculaire repousse les molécules : celles-ci, cédant à l'action de ces forces, s'éloignent sans cesse jusqu'à ce qu'elles rencontrent des obstacles qui les arrêtent. Ainsi l'air qui est renfermé dans un vase fait sans cesse un effort contre les parois pour les presser et les repousser plus loin, et il faut toujours ou que les parois éclatent sous cette pression, ou qu'elles soient assez fortes pour y résister. Pour prouver cette vérité, imaginons un vase d'un litre de capacité et fermé de toutes parts : s'il était vide et que l'on y fît une ouverture, l'air extérieur s'y précipiterait pour le remplir; au contraire, s'il était plein et que l'on en perçât les parois, et qu'il n'y eût pas d'air au dehors, l'air intérieur sortirait à l'instant; mais quand il y a de l'air au dehors comme au dedans, l'air extérieur fait au dehors autant d'efforts pour entrer que celui qui est dedans en fait pour sortir; et, entre ces deux pressions égales, l'équilibre subsiste aux points où le vase est ouvert, comme aux points où il est fermé par des parois. C'est donc l'extérieur qui arrête la force répulsive de l'air intérieur. Cette propriété est si remarquable, qu'il faut la démontrer par une expérience.

Si l'on met une vessie à moitié pleine d'air sous le récipient d'une machine pneumatique, et qu'on fasse le vide, on verra la vessie se gonfler d'autant plus qu'on aura plus fait le vide; elle aura bientôt pris tout le volume dont elle était susceptible. On voit par là que l'air qu'elle contenait faisait un effort considérable pour repousser la paroi de la vessie, et que l'air extérieur qui était sous le récipient arrêtait seul cet effort.

L'air n'a pas de volume primitif, il tend sans cesse à occuper un volume plus grand; un litre d'air versé dans un espace vide de plusieurs milliers de mètres cubes se répandrait partout dans cet espace, et il en presserait les parois dans tous lès sens, en faisant encore un effort pour occuper une place plus large.

On appelle *élasticité de l'air*, ou sa *force élastique*, ou sa *tension*, la pression que l'air exerce sur les parois des vases qui le contiennent.

On dit que l'air est en équilibre lorsque sa force élastique est la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau.

Pression de l'air. — Toutes les couches inférieures de l'air sont pressées par les couches supérieures : cette pression se fait de diverses manières, selon la hauteur à laquelle on s'élève au-dessus du niveau des mers. On peut prouver l'existence de cette pression par diverses expériences. On met sur la platine de la machine pneumatique un cylindre en verre dont les parois sont très-épaisses et qui est fermé à sa partie supérieure par une membrane de vessie : la pression de l'air extérieur tend à abaisser cette vessie, tandis que la pression de l'air intérieur tend à la soulever, et ces deux pressions étant égales, elle reste en équilibre; mais si l'on enlève de l'air au moyen de la machine pneumatique, la pression intérieure deviendra plus faible, et la membrane, cédant à la pression extérieure, devra fléchir et s'enfoncer en dedans; de sorte que, si l'on fait le vide, cette membrane sera très-tendue et par conséquent très-pressée. Si alors on donne avec le doigt un petit coup au milieu de la membrane, elle éclate en plusieurs pièces et l'on entend une explosion assez forte, tant est grande la pression de l'air extérieur et l'effort qu'il fait pour rentrer dans le vase; car c'est en rentrant avec impétuosité qu'il produit tant de bruit.

Si l'on fait le vide sous une cloche, dès les premiers coups de piston cette cloche adhère fortement au plan qui la supporte, et cette adhérence devient plus forte à mesure que le vide approche d'être plus parfait. Ce phénomène est encore dû à la pression des couches supérieures sur les couches inférieures. On fait encore cette expérience d'une autre manière, au moyen de deux hémisphères creux qu'on nomme *hémisphères de Magdebourg* et qui peuvent se réunir pour former la sphère complète. Un robinet permet de faire le vide entre eux et de l'y conserver. Lorsque le vide est fait, il n'est plus possible de séparer les hémisphères, à moins d'employer une force très-grande, et alors, à l'instant de la séparation, il se produit un bruit très-fort occasionné par la rentrée subite de l'air.

DU BAROMÈTRE.

Le baromètre est un instrument qui sert à mesurer la pression que l'air exerce sur un point quelconque de la surface de la terre. Pour conduire graduellement à sa construction, soit un tube A (*fig.* 20, *Pl. I*) ouvert aux deux bouts et plongé dans un vase rempli d'eau ; le liquide se mettra dans le tube au même niveau que dans le vase, à l'effet de la capillarité près. La pression de l'atmosphère ne saurait s'opposer à cet établissement de niveau, parce qu'elle agit également à l'intérieur du tube et à l'extérieur; mais si l'on fait une succion dans le tube, on diminuera l'élasticité de l'air qui y est enfermé : dès lors l'équilibre sera rompu, et le liquide s'élèvera dans ce tube jusqu'à ce que son poids, plus l'élasticité de l'air restant, fasse équilibre à la pression de l'atmosphère. Si, au lieu d'eau, on met du mercure dans le vase, on aura un phénomène semblable, à cette différence près que le mercure étant treize fois et demie plus pesant que l'eau, il s'élèvera treize fois et demie moins haut que l'eau pour une même succion.

Si l'on prenait un tube d'une certaine longueur, et qu'on pût y faire par aspiration un vide parfait, il est évident que le liquide s'y élèverait jusqu'à ce que le poids de la colonne fit équilibre à la pression totale de l'atmosphère, dont on aurait ainsi une évaluation. On a fait cette expérience d'une manière fort simple avec le mercure. On prend un tube de verre d'un mètre environ de hauteur, fermé à une extrémité, et on le remplit de mercure; puis, appliquant le doigt sur l'extrémité ouverte, on le retourne et on le plonge dans une petite cuvette remplie de mercure; aussitôt qu'on retire le doigt, le liquide descend de lui-même jusqu'à ce qu'il n'en reste plus dans le tube qu'un volume dont le poids fait précisément équilibre à la pression de l'atmosphère : c'est cet appareil qui prend le nom de *baromètre*. La hauteur de la colonne se mesure à partir du niveau du liquide dans la cuvette. Au niveau des mers, cette hauteur est, valeur moyenne, de $0^m,763$.

Élévation des autres liquides en vertu de la pression atmosphérique. — Connaissant la hauteur $0^m,763$ du mercure dans le tube du baromètre au niveau des mers, et le rapport de pesanteur spécifique de ce liquide aux autres, il est facile de déterminer par le calcul la hauteur à laquelle un liquide quelconque s'élèverait en vertu de la même pression, car ces hauteurs sont en raison inverse des pesanteurs spécifiques; pour l'eau, par exemple, on sait que sa pesanteur spécifique est à celle du mercure dans le rapport de 1 à 13,586. Si donc on fait la proportion

1 (pesanteur spécifique de l'eau) : 13,586 (pesanteur spécifique du mercure) :: 0,763 (hauteur du mercure dans le baromètre) : x (hauteur de l'eau dans le baromètre),

on aura

$$x = 13,586 \times 0,763 = 10^m,366$$

pour la hauteur à laquelle l'eau peut s'élever.

Cette hauteur est variable dans les différents lieux et dans les différents temps, comme celle du mercure.

Construction du baromètre. — Lorsqu'on veut construire un baromètre sur les indices duquel on puisse compter, il faut prendre les précautions suivantes : bien sécher le tube à l'intérieur, bien purger le mercure d'air, le bien nettoyer et le priver aussi de toute humidité. La dessiccation du tube et du mercure prévient les effets de la capillarité. Il faut donc employer du mercure bien pur et le chauffer jusqu'à le faire bouillir. On l'introduit ensuite dans un tube bien sec; mais comme il reste encore quelques bulles d'air adhérentes à la paroi de ce tube entre elle et le mercure, il faut les expulser. C'est à quoi l'on parvient en chauffant ce tube par degrés et jusqu'à y faire en quelque sorte bouillir le mercure une seconde fois. Après cette opération, on peut renverser le tube dans une cuvette remplie de mercure purgé d'air par l'ébullition; l'espace qui reste dans le tube au-dessus du liquide, après l'établissement d'équilibre, doit être parfaitement vide d'air.

On peut aussi se servir d'une figure contournée, dont la plus longue branche est fermée à la partie supérieure; la plus courte fait alors

office de cuvette. La hauteur de la colonne de mercure qui fait équilibre à la pression de l'atmosphère doit se mesurer toujours à partir du niveau du liquide dans la cuvette ou dans la petite branche, niveau qui lui-même est variable, selon que la colonne se raccourcit ou s'allonge. Il y a deux manières d'avoir cette mesure exacte : 1° au moyen d'une échelle mobile dont on amène toujours le zéro au niveau du liquide dans la cuvette ou dans la branche qui la remplace; 2° au moyen d'une échelle fixe; mais alors il faut aviser au moyen de trouver un niveau constant dans la cuvette. On parvient, dans ces instruments, à rendre le niveau constant, en disposant la cuvette de manière à ce qu'on puisse augmenter ou diminuer à volonté sa capacité; pour cela, on la termine à la partie inférieure par une peau de mouton, qu'on peut faire rentrer plus ou moins dans l'intérieur au moyen d'une vis de pression (*fig.* 21, *Pl. I*). La partie supérieure de la cuvette est aussi fermée par une peau, qui est toujours assez poreuse pour laisser passer l'air, mais qui ne laisse pas passer facilement le mercure. Il résulte de cette construction qu'au moyen de la vis on peut toujours faire monter le mercure jusqu'au sommet du tube, et que dès lors l'instrument se trouve fermé et par conséquent très-portatif : il ne s'agit plus que de le fixer invariablement dans l'étui qui le renferme.

Les dispositions de l'instrument peuvent varier : on en fait à cuvette, à siphon et à cadran; dans tous, la hauteur de la colonne de mercure doit être prise à partir du niveau de la surface du liquide soumise à la pression atmosphérique.

Les baromètres à cuvette sont ceux dont le tube est droit et plonge par son extrémité dans une cuvette.

Les baromètres à siphon sont ceux dont le tube est recourbé à sa partie inférieure en forme de siphon.

Le baromètre à cadran ne diffère du baromètre à siphon qu'en ce qu'au-dessus de l'orifice ouvert de la plus courte branche, il se trouve une petite poulie A (*fig.* 22, *Pl. I*) parfaitement mobile et dont le centre est fixé invariablement à celui d'un cadran derrière lequel est attaché le baromètre. Cette poulie correspond à une aiguille destinée à parcourir les divisions du cadran, et sa circonférence est entourée d'un fil aux extrémités duquel sont suspendus deux petits poids P et P′, dont l'un pénètre dans l'intérieur du tube et dont l'autre se trouve dehors. Le poids extérieur P′ sert de contre-poids au poids P, qui est tangent à la surface du mercure, et le système de ces deux poids, qui est parfaitement mobile autour de la poulie A, est tel, que le poids P ne fait que poser sur la surface du mercure sans jamais la déprimer en aucune manière. D'après cette disposition, il est clair que, quand le mercure s'abaissera dans la branche ouverte et s'élèvera dans l'autre, c'est-à-dire quand l'atmosphère sera plus pesante qu'à l'ordinaire, le poids tombera avec le mercure, et l'extrémité de l'aiguille viendra occuper la partie supérieure du cadran; quand le mercure montera dans la plus courte branche et s'abaissera dans l'autre, le poids P montera avec lui et l'aiguille viendra se placer dans la partie inférieure du cadran; enfin, quand le mercure sera à une hauteur moyenne, c'est-à-dire quand le poids de l'atmosphère sera moyen

lui-même, l'aiguille prendra une position intermédiaire. Comme il y a, dans les différentes parties du baromètre à cadran, beaucoup de résistance à vaincre, il est bon, quand on veut l'observer, de le frapper doucement. Quoi qu'il en soit, ce baromètre ne doit pas être employé dans les observations qui exigent une grande exactitude.

Parmi les baromètres à siphon, il y en a un qui réunit tous les avantages, soit pour l'exactitude de ses indications, soit pour la facilité avec laquelle on peut le transporter dans les voyages : c'est le baromètre de M. Guy-Lussac.

La *fig*. 23, *Pl. I*, représente le tube barométrique dans sa situation propre à l'observation : N, *n* sont les deux niveaux du mercure; la grande branche AB est d'un égal diamètre jusqu'en F. En ce point, le tube AF est soudé avec un autre tube FBC fort, en verre, dont le diamètre intérieur doit être de 1 à 2 millimètres. La petite branche CD du baromètre doit avoir le même diamètre que la partie NF de la grande; elle est fermée en D; mais en E, à la distance de 2 à 3 centimètres de D, se trouve un petit trou capillaire par lequel le mercure ne peut point s'échapper à moins d'une pression assez grande, et qui néanmoins permet à l'air d'entrer dans la cuvette et d'en sortir librement. Il y a deux choses qui caractérisent ce baromètre : 1° le petit trou capillaire qui laisse une libre circulation à l'air et empêche cependant le mercure de sortir; 2° le tube CBF, d'un diamètre assez étroit pour que l'air ne puisse pas diviser la colonne de mercure, comme cela a lieu dans les autres baromètres à siphon.

Toute cause qui fera varier d'une manière quelconque la pression atmosphérique, fera varier aussi la longueur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre. Les observations de cette colonne avertiront donc des variations survenues dans la pression atmosphérique; de là viennent les expressions usitées : la pression atmosphérique est de 76 à 74 centimètres; elles ne font autre chose que d'indiquer le poids qui lui fait équilibre.

L'équilibre établi entre ces deux forces permet d'évaluer l'une d'elles au moyen de l'autre. Supposons, par exemple, la hauteur du baromètre de 76 centimètres; il est aisé de s'assurer qu'une colonne de mercure de cette hauteur, sur un pied carré de base, pèserait environ 23 quintaux. Ainsi chaque pied carré de surface prise sur notre corps supporte de la part de l'air une pression de 2 300 livres. On ne doit pas s'étonner que nous restions insensibles à un poids aussi considérable : il est contre-balancé et détruit par la force élastique de l'air renfermé dans notre corps. La réaction de cette force est précisément égale à la pression atmosphérique et lui fait équilibre.

Variations qu'éprouve le baromètre. — Le même baromètre, placé dans le même lieu à poste fixe, éprouve sans cesse des variations; ainsi l'état physique de l'air est soumis à des changements continuels qui font varier, pour ainsi dire, à chaque instant la quantité de la pression atmosphérique dans le même lieu; mais les causes de ces changements sont loin d'être connues et encore plus d'être appréciées. Par une longue suite d'observations, on a cherché une liaison entre les mouvements du mercure dans le baromètre et la circonstance météorologique que présente l'atmosphère; de là les indications adoptées sur le

baromètre à cadran de *pluie*, *vent*, *tempête*, *etc.*; mais cette liaison n'est fondée sur rien en théorie : elle est tout au plus une probabilité d'autant plus grande, qu'on aura vu plus souvent un certain état du baromètre coïncider avec le même état météorologique de l'atmosphère. Parmi les variations que le baromètre offre habituellement dans le même lieu, l'observation a fait reconnaître un mouvement oscillatoire dont la période est de vingt-quatre heures. Dans ce balancement diurne, le liquide atteint le maximum de hauteur vers 9 heures du matin; il descend ensuite vers 4 heures du soir; il s'élève de nouveau jusque vers 11 heures, et s'abaisse de nouveau vers 4 heures du matin; ensuite il remonte pour retrouver son maximum de hauteur vers 9 heures.

Mesure des hauteurs par le baromètre. — Il est très-naturel d'employer le baromètre à la mesure des hauteurs au-dessus du niveau de la mer ou tout autre terme de comparaison. On conçoit aisément, en effet, qu'à mesure qu'on s'élève, la colonne d'air qui agit dans le baromètre se raccourcissant, la pression exercée sur cette surface diminue, et la colonne du liquide, dont le poids fait équilibre à cette pression, diminue aussi; mais, pour employer ce moyen de mesurer une hauteur, il faut connaître la loi que suit l'abaissement du mercure à raison des élévations de l'observateur. Si l'atmosphère avait partout la même densité, c'est-à-dire si l'air était comme l'eau un fluide incompressible, rien ne serait plus facile que de mesurer les hauteurs par le baromètre; en effet, le mercure étant environ dix mille fois plus pesant que l'air atmosphérique, si le baromètre marquait dans la plaine $0^m,76$, on en conclurait que la hauteur de la colonne d'air de même base qui s'étendrait jusqu'aux limites de l'atmosphère, serait dix mille fois plus haute, c'est-à-dire qu'elle serait de 7600 mètres; si, après avoir transporté le baromètre au haut d'une montagne, la colonne de mercure n'était plus que de $0^m,56$, on en conclurait que la hauteur de l'atmosphère au-dessus de ce point serait 5600 mètres, et par conséquent la hauteur de la montagne au-dessus du niveau de la première observation serait 2 000 mètres, différence entre les deux nombres.

Mais nous avons vu que l'air était un fluide compressible; sa densité à toutes les hauteurs n'est pas la même qu'à la surface de la terre; elle va graduellement en diminuant jusqu'à ce qu'enfin elle devienne tout à fait insensible. Il en résulte que la hauteur de la colonne d'air qui fait équilibre à la colonne de mercure ne peut plus être calculée d'après le rapport de 1 à 10463, qui n'est vrai que pour l'air au degré de densité où nous le voyons habituellement. Il est important, d'après cela, de connaître la loi des variations de densités qui peuvent avoir lieu dans l'atmosphère : c'est à quoi conduit l'expérience de Mariotte.

LOI DE MARIOTTE.

La loi de la variation du volume d'une masse de gaz correspondant à une variation de pression est due à Mariotte. Elle consiste en ce qu'une masse de gaz occupe des volumes qui sont en raison inverse des pressions auxquelles elle est soumise. Pour démontrer cette loi d'une manière expérimentale, on prend un tube de verre recourbé

du diamètre de ceux employés pour les baromètres (*fig.* 24, *Pl. I*); il faut que les branches soient inégales. La longueur ordinaire de la branche la plus courte est de 16 à 20 centimètres; la longueur de la plus grande branche doit être de 2 mètres à $2^m,90$. Le tout est fixé sur une planche qui porte une division adaptée aux deux tubes. On introduit par la partie ouverte une petite quantité de mercure, de manière que le niveau soit établi dans les deux branches suivant BD; la hauteur AB est divisée en millimètres. Quand le niveau est établi, l'air enfermé dans CD fait équilibre à la pression de l'atmosphère, c'est-à-dire à 763 millimètres de mercure. Si l'on verse du mercure dans la branche BA jusqu'à 763 millimètres au-dessus de la nouvelle ligne du niveau *a*, qui s'établit alors dans la petite colonne, il est clair que l'air renfermé dans cette colonne supportera une pression égale à deux fois le poids de 763 millimètres de mercure. Dans ce cas, on remarquera que son volume est diminué de moitié. Si l'on ajoute encore du mercure dans la branche AB, et jusqu'à la hauteur de $2^m,289$ (c'est-à-dire trois fois 0,763) au-dessus de la ligne du niveau *b*, qui s'établira dans ce nouveau cas, l'air enfermé dans la petite colonne supportera une pression égale à quatre fois le poids de 763 millimètres de mercure; dans ce cas, on remarquera que son volume est diminué des trois quarts; on voit donc, d'après ces expériences, que la pression étant 1, 2, 4, etc., les volumes correspondants de l'air renfermé dans la petite colonne sont 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, etc.; d'où il faut conclure que l'air se comprime dans le rapport du poids dont il est chargé.

POMPE ASPIRANTE.

L'élévation de l'eau dans les pompes n'est qu'un effet très-simple de la pression de l'atmosphère qui force le liquide à s'élever dans le vide à la hauteur d'environ $10^m,4$.

Dans la pompe aspirante (*fig.* 25, *Pl. I*), le piston est garni d'une soupape F, qui s'ouvre de bas en haut. La partie ABCD où se meut ce piston se nomme *corps de pompe*, et celle GHIR *tuyau d'aspiration*. Il y a une soupape en E à la jonction des deux tuyaux, ou bien en HI au niveau de l'eau; elle s'ouvre aussi de bas en haut. Lorsqu'on soulève le piston, l'air contenu dans la partie ABCD se raréfie; dès lors l'air du tuyau d'aspiration GHIR soulève la soupape E et se répand dans le corps de pompe, de sorte que la raréfaction se trouve bientôt la même dans toute la capacité de la pompe. Mais alors, comme l'élasticité de l'air intérieur ne fait plus équilibre à la pression atmosphérique, l'eau s'élève d'une certaine quantité dans le tuyau d'aspiration. En faisant ensuite descendre le piston, l'air qui se trouve au-dessous se comprime et la soupape E se ferme; bientôt cet air acquiert par la compression assez d'élasticité pour soulever la soupape F et s'échapper. En soulevant de nouveau le piston, la soupape F se ferme, la soupape E s'ouvre, et l'air dilaté permet encore à une certaine quantité d'eau de s'élever dans la pompe. En réitérant cette manœuvre, l'eau finit par parvenir en E et par passer dans le corps de pompe; bientôt elle parvient à la soupape F, la soulève et passe au-dessus d'elle; chaque coup de piston en fait ensuite passer une nouvelle quantité, de sorte qu'en continuant, on pourrait élever au-dessus du piston une

colonne d'eau assez considérable, jusqu'à ce qu'enfin son poids s'opposât à la manœuvre. On doit concevoir qu'en faisant monter le piston, il faut soulever avec lui le poids de la colonne liquide qui se trouve au-dessus, plus le poids de l'atmosphère. On dispose en quelque point du tuyau supérieur un dégorgeoir S par lequel le liquide s'échappe.

NO étant le plus bas point de la course du piston, la distance NH de ce point au niveau de l'eau ne doit pas être plus grande que 10 mètres, sans quoi le liquide n'arriverait jamais à la soupape F, puisque la colonne d'eau que la pression de l'atmosphère peut soutenir n'est que de 10,366, en supposant même que le baromètre marque 0,763; sur une montagne élevée, où la pression de l'atmosphère est plus petite, la distance NH devrait être encore moindre pour que la pompe pût faire son effet. Cette théorie est vérifiée par l'expérience journalière des fontainiers.

La soupape E se place quelquefois à la jonction du corps de pompe et du tuyau d'aspiration, ou bien un peu au-dessus du niveau de l'eau; dans l'un et l'autre cas, il peut arriver que l'eau parvenue à un certain point, en *ab* par exemple, s'arrête tout à coup et ne puisse s'élever davantage, quoique la distance AH soit moindre que 10 mètres. Voici comment cela peut se faire : le piston étant au plus haut point de sa course et l'eau étant parvenue en *ab*, la force élastique de l'air intérieur, plus le poids de la colonne d'eau, équivalent à la pression de l'atmosphère; s'il arrive, par la construction de la pompe, que la raréfaction de l'air intérieur soit telle, que le piston étant revenu en NO, au plus bas point de sa course, le ressort de l'air qui se trouve au-dessous de lui soit égal à celui de l'air extérieur, la soupape F ne s'ouvrira pas; donc, si l'on relève le piston, l'air ne sera pas plus dilaté que la première fois, et, par conséquent, l'eau ne pourra plus monter.

Pour remédier à cet effet, il faudrait que le piston pût descendre un peu plus bas que NO, afin de comprimer davantage l'air, ou bien il faudrait qu'il pût s'élever au-dessus de AD, afin que l'air pût se dilater davantage. En soumettant cette anomalie au calcul, on trouve que, pour qu'une pompe aspirante fasse toujours son effet, il faut que le carré de la moitié de la distance entre le plus haut point de la course du piston et le niveau de l'eau doit être moindre que le jeu du piston multiplié par la hauteur à laquelle l'eau s'élèverait dans le vide en vertu de la pression de l'atmosphère au lieu d'observation.

POMPE FOULANTE.

Dans la pompe foulante, la pression de l'atmosphère n'influe en aucune manière sur les effets de cette machine; l'impénétrabilité du liquide en est la seule cause. AB (*fig.* 26, *Pl. I*) est un tuyau placé dans l'eau, toujours très-court et fermé à la partie inférieure, qu'on nomme *corps de pompe;* un piston, garni d'une soupape F qui s'ouvre de haut en bas, se meut dans l'intérieur de ce tuyau; CDE est un tuyau plus étroit qui communique avec le premier et s'élève jusqu'au point où l'on veut conduire le liquide. Une soupape G, qui s'ouvre de bas en haut, est placée vers la jonction des deux tuyaux.

On peut disposer cette machine de différentes manières, toutes analogues à celle que nous venons de dire.

Le piston étant au plus haut point d'élévation, la soupape F se trouve naturellement ouverte et le liquide remplit le corps de pompe, ainsi que le tuyau CDE, jusqu'au niveau MN; quand le niveau est établi, la soupape G est fermée; lorsqu'on abaisse le piston, la soupape F se ferme en vertu de l'impénétrabilité du liquide, et, par la même cause, la soupape G s'ouvre; alors le liquide est contraint à passer dans le tuyau montant; lorsqu'on relève le piston, l'eau qui se trouve dans le tuyau montant exerce par son poids une pression sur la soupape G, la ferme et se bouche ainsi à elle-même le passage; au contraire, la soupape F s'ouvre, et il entre dans le corps de pompe une nouvelle quantité d'eau, qu'on force comme la première à passer dans le tuyau CDE, et ainsi de suite; de cette manière, le liquide parvient bientôt jusqu'au déversoir C, placé à une hauteur quelconque, et il s'en écoule ensuite au dehors une certaine quantité à chaque coup de piston.

On peut, au moyen de cette pompe, élever l'eau aussi haut qu'on le désire; cependant il est facile de concevoir que, pour abaisser le piston, il faut employer une force capable de mouvoir une colonne d'eau dont la base serait celle du piston et dont la hauteur serait déterminée par celle du liquide dans le tuyau montant; plus cette hauteur est grande, plus il faut déployer de force, de sorte qu'il y a nécessairement une certaine limite, déterminée par la force qu'on a à sa disposition. On emploie la pompe foulante lorsqu'il s'agit d'élever l'eau à une grande hauteur, et qu'on peut subvenir à la dépense de force nécessaire; les pompes qui sont mues par les courants des rivières sont de ce genre; les pompes à incendie en sont également. Cependant cette machine présente un inconvénient assez grave : c'est que, s'il arrive le plus léger accident au corps de pompe, il faut pour le réparer démonter ce tuyau et le tirer de l'eau, à moins qu'on ne puisse vider le bassin, ce qui est souvent impossible.

POMPE ASPIRANTE ET FOULANTE.

Dans la pompe aspirante et foulante (*fig.* 27, *Pl. I*), le piston n'a point de soupape; lorsqu'il s'élève dans la pompe, il raréfie l'air et produit l'ascension de l'eau dans le tuyau d'aspiration; lorsqu'il descend, il foule l'air devant lui et le force à s'échapper en soulevant la soupape F, qui s'ouvre du dedans au dehors. Lorsque l'eau est parvenue dans le corps de pompe, elle est de même foulée par le piston et chassée dans le tuyau montant, dans lequel elle peut être portée à une hauteur considérable, jusqu'à ce qu'enfin son poids s'oppose à la manœuvre. On doit voir que, quand le piston descend, il a à mouvoir tout le poids d'une colonne liquide dont il est la base et dont la hauteur est déterminée par celle de la colonne enfermée dans le tuyau montant. On lit dans divers ouvrages de physique que l'élévation de l'eau au moyen de la pompe aspirante et foulante n'est plus limitée à $10^{m},366$, et que, par conséquent, cette pompe est plus avantageuse que la première. Cette manière d'en prouver les avantages n'en donne pas une idée exacte; il faut remarquer que la force qu'il est

nécessaire d'employer pour fouler l'eau dans le tuyau montant est simplement égale au poids d'une colonne liquide qui aurait le piston pour base et pour hauteur l'élévation de l'eau dans le tuyau; la pression de l'atmosphère n'y influe en rien, parce qu'elle agit au-dessus du piston comme au-dessous, d'après la disposition des tuyaux. Au contraire, dans la pompe aspirante, on a à la fois à soulever le poids de la colonne liquide qui se trouve au-dessus du piston, plus le poids de l'atmosphère, qui équivaut à celui d'une colonne d'eau de 10,366. Le véritable avantage de la pompe aspirante et foulante, sur celle qui est simplement *aspirante*, est donc qu'au moyen de la première on peut, avec la même force, élever l'eau à 10^{m},366 plus haut qu'au moyen de la seconde. Cette pompe a aussi sur la pompe foulante simple cet avantage que, s'il arrive un accident au corps de pompe, on peut le réparer plus facilement, puisque ce tuyau est hors de l'eau.

MACHINE PNEUMATIQUE.

Nous avons vu que l'air comprimé possède une force élastique assez considérable et qu'il se dilate jusqu'à ce qu'il soit revenu à l'état où il se trouve habituellement autour de nous; à ce point il ne manifeste plus aucune espèce d'élasticité. Nous allons faire voir actuellement que l'air qui nous environne est aussi à un certain état de condensation, et qu'il n'attend pour manifester son élasticité que de se trouver au milieu d'un air moins condensé.

Soit un vase qui ne renferme que la quantité d'air dont il peut naturellement s'emplir lorsqu'il plonge dans notre atmosphère. Supposons que le robinet soit fermé et qu'on prenne une petite pompe comme celle *fig.* 28, *Pl. II*, qu'on abaisse son piston jusqu'au plus bas point de sa course et qu'on le visse à l'ouverture du vase, ayant soin de mettre une rondelle de cuir imbibée d'huile à la jonction pour fermer exactement. Si l'on remonte le piston, il ne se trouvera pas d'air sous lui dans la pompe, ou du moins très-peu. Qu'on ouvre alors le robinet, on entendra pendant quelques instants un sifflement semblable à celui que produit l'air en sortant d'un tube où il a été comprimé; d'où l'on doit conclure qu'il sort une petite quantité d'air renfermée dans le vase : ce qui ne peut avoir lieu qu'en vertu de l'élasticité. Si le sifflement s'arrête après quelques instants, c'est parce que l'air se trouve bientôt dans la pompe et dans le vase au même degré de condensation. Qu'on ferme alors le robinet et qu'on dévisse la pompe, l'air qui reste dans le vase est déjà moins dense que l'air qui nous environne; il est cependant encore susceptible de manifester son élasticité, et, pour le prouver, il suffit de répéter sur lui l'expérience que nous venons de faire sur l'air au degré de condensation ordinaire. En ouvrant le robinet, on entendra encore pendant quelques instants le même sifflement, mais moins fort que précédemment; on pourra répéter successivement cette opération un certain nombre de fois, mais à chaque fois le sifflement sera moins fort, et enfin, à un certain point, il ne se produira plus du tout. On peut conclure alors qu'il ne se trouve plus d'air dans le vase; mais il sera plus exact de dire qu'il y est extrêmement raréfié.

Nous venons de décrire essentiellement la machine pneumatique et

ses effets, mais nous avons réduit cet instrument à sa plus grande simplicité; actuellement nous allons lui donner une disposition plus commode.

Si l'on ne veut pas faire la dépense d'une machine à deux corps de pompe, on peut se contenter d'avoir une petite pompe dont la partie inférieure est garnie d'une petite soupape *a*, qui s'ouvre de bas en haut et dont le piston *b* (*fig.* 29, *Pl. II*) est percé d'un trou cylindrique très-étroit, couvert d'une soupape qui s'ouvre aussi de bas en haut. Cette pompe étant montée sur un vase, si l'on fait descendre le piston, l'air se comprimera et fermera la soupape *a*; au contraire, il soulèvera la soupape *b* et s'échappera : de sorte que, quand le piston arrivera au fond de la pompe, il ne restera plus d'air sous lui, si ce n'est dans le petit canal dont il est percé, et que, pour cette raison, on fait toujours très-étroit. Si l'on remonte le piston, l'air du vase sur lequel la pompe est adaptée soulèvera la soupape *a* par son élasticité et se répandra dans le corps de pompe; mais alors la soupape *b* restera fermée, parce que l'élasticité de l'air intérieur, qui la sollicite de bas en haut, est plus faible que celle de l'air extérieur, qui la sollicite de haut en bas. Si l'on fait descendre le piston, l'air du corps de pompe se comprimera; il deviendra par conséquent plus élastique que l'air du vase, et dès lors fermera la soupape *a*; bientôt aussi il deviendra plus élastique que l'air extérieur, il soulèvera alors la soupape *b* et s'échappera; en remontant de nouveau le piston, puis le faisant redescendre, et ainsi de suite, un certain nombre de fois, les mêmes effets auront lieu, et l'on parviendra à raréfier extrêmement l'air dans le vase.

On fermera le robinet avant d'enlever la pompe.

Au lieu d'un vase, on peut se servir d'une cloche garnie d'un robinet à sa partie supérieure; mais alors il faudra se procurer une plaque de marbre ou de verre bien plane, sur laquelle on posera la cloche en mettant sous ses bords une rondelle de cuir imbibée d'huile; dans tous les cas, on emploiera la petite pompe que nous venons de décrire : il faudra opérer sur des vases d'une petite capacité.

MACHINE PNEUMATIQUE A DEUX CORPS DE POMPE.

Dans des expériences très-exactes, ou lorsqu'on veut opérer sur des grands vases, il faut employer la machine composée de deux corps de pompe qui aboutissent à un tube dont l'extrémité *c* (*fig.* 30, *Pl. II*) se rend au milieu de la platine sur laquelle on dispose les cloches ou les vases qu'on veut purger d'air. On met la machine en mouvement au moyen de la manivelle *ab*, garnie d'un pignon engrené dans les dents taillées sur les tiges des pistons. On peut à volonté ouvrir ou fermer les communications de la cloche avec les corps de pompe, au moyen d'un robinet placé en quelque point du tube dont *c* est l'extrémité. On ferme ou l'on ouvre la communication avec l'air extérieur au moyen d'un autre robinet. *d* est une éprouvette qui communique avec la cloche, et indique le degré de la rareté de l'air. Dans la machine que représente la figure, l'éprouvette consiste en un tube de verre droit qu'on a rempli de mercure, et qu'on a renversé dans une petite cuvette remplie aussi de ce liquide. Le mercure reste suspendu dans le tube par la force élastique que l'air exerce à sa surface dans

la cuvette; mais à mesure que l'air est raréfié, cette force diminue, dès lors le mercure retombe par son propre poids, et enfin, lorsque le vide est fait, autant que possible, il est entièrement ou presque entièrement redescendu dans la cuvette.

Emploi de la machine pneumatique.

La machine pneumatique est employée dans un grand nombre d'expériences; nous citerons les suivantes :

Si l'on place un animal vivant sous le récipient de la machine et qu'on fasse le vide, on le voit enfler et mourir; les substances aériformes renfermées dans l'intérieur de son corps se dilatent et brisent les vaisseaux qui les contiennent, parce que leur force élastique n'est plus contre-balancée par celle de l'air qui entoure l'animal.

Si l'on met sur le plateau un récipient de forme cylindrique, ouvert des deux côtés, qu'on recouvre l'ouverture supérieure avec une peau de parchemin; cette peau crève avec grand bruit lors qu'on fait le vide : un plateau de verre qu'on assujettirait sur le cylindre avec de la cire, serait brisé encore plus facilement. Si l'on recouvre le cylindre avec un vase de bois rempli d'eau ou de mercure, lorsque le vide est fait, le liquide passe à travers le bois et tombe dans l'intérieur du cylindre, goutte à goutte si c'est de l'eau, et sous la forme d'une fine pluie d'argent si c'est du mercure. On voit aisément la cause de ce fait dans la pression que l'air atmosphérique exerce sur le liquide, laquelle n'est plus équilibrée par la réaction de l'air atmosphérique contenu dans le cylindre.

Nous avons dit que les molécules des gaz sont dans un état répulsif, qu'elles tendent continuellement, en vertu de cette propriété, à se dilater; un moyen simple de mettre cette propriété en évidence est de placer sous le récipient une vessie bien fermée, de laquelle la presque totalité de l'air a été retirée. La vessie, à mesure que l'on fera le vide, se gonflera au point qu'elle finira par remplir une cloche de plusieurs litres.

MACHINE DE COMPRESSION.

Les machines à compression sont l'inverse des machines pneumatiques; celle-ci sert à raréfier l'air : les machines à compression, au contraire, sont destinées à condenser l'air dans un espace déterminé. La machine à condenser l'air est composée essentiellement d'un corps de pompe AB (*fig.* 31, *Pl. II*) auquel on visse un récipient R; mais elle diffère de la machine pneumatique par la disposition des soupapes, et, de plus, en ce que le piston est plein. A la jonction du récipient et du corps de pompe, une soupape S s'ouvre de haut en bas, de manière à laisser passer l'air qui tend à entrer dans le récipient et à fermer le passage à celui qui tendrait à en sortir; une seconde soupape S', placée latéralement dans le corps de pompe, ouvre de même une issue à l'air extérieur sans lui permettre ensuite de sortir du corps de pompe. Lorsque le piston s'élève à partir du fond, il se forme un vide au-dessous de lui, l'air du récipient ne peut s'échapper, parce qu'en pressant la soupape S, il la tient fermée; mais l'air extérieur, par sa force élastique, soulève la soupape S' et se précipite dans le

corps de pompe. Le piston en redescendant refoule cet air, et augmente son élasticité ; alors la soupape S′ se referme, et la soupape S, au contraire, est soulevée par la pression toujours croissante de l'air de la pompe qui pénètre dans le récipient : cette soupape se referme d'elle-même lorsque le piston est revenu au point de départ. En continuant à faire monter et descendre successivement, on introduit dans le récipient une grande quantité d'air.

Les machines à condenser l'air sont ordinairement construites avec deux corps de pompe, comme les machines pneumatiques ; le récipient est un cylindre très-épais, garni d'une monture en cuivre, et, de plus, enveloppé d'un grillage en fer pour prévenir les accidents qui pourraient résulter de la rupture du cylindre si la condensation était très-forte.

C'est sur le même principe que repose la construction du fusil à vent : le récipient ou réservoir est dans la crosse ; il communique au moyen d'un robinet avec le canon. On peut tirer plusieurs coups de suite, selon que la condensation de l'air renfermé dans la crosse est plus grande.

DU SIPHON.

Le siphon est un tube courbé à branches inégales dont on se sert souvent pour transvaser les liquides. La branche la plus courte plonge dans le liquide proposé ; on fait à l'extrémité de la plus longue une succion pour y raréfier l'air, et amener le liquide jusqu'à l'ouverture A (*fig.* 32, *Pl. II*), par laquelle il s'établit un écoulement qui ne finit que quand le niveau du liquide dans le vase s'est abaissé jusqu'en *a* ; alors l'air rentre dans le tube.

Pour concevoir comment l'écoulement a lieu, il faut remarquer que la force qui, en B, presse le liquide et le sollicite à s'élever en C, est égale à la pression de l'atmosphère, moins le poids de la colonne liquide CB, et que la force qui, en A, sollicite le liquide à remonter en C, est égale à la pression de l'atmosphère, moins le poids de la colonne CA ; or, cette dernière colonne étant plus grande que CB, il en résulte que la force effective qui agit en A est plus petite que celle qui agit en B ; il s'établit un écoulement en vertu de la différence. On doit bien concevoir que pour que le siphon produise son effet, la distance du sommet C au niveau du liquide ne doit pas excéder la hauteur à laquelle ce liquide peut être soutenu par la pression de l'atmosphère ; cette hauteur est de $10^{m},36$ pour l'eau, et de $0^{m},763$ pour le mercure.

Pour l'usage habituel, on donne au siphon une disposition plus commode, comme on le voit sur la *fig.* 33, *Pl. II.* Celui qui fait usage de cet appareil ferme l'orifice A avec son doigt pendant qu'il fait la succion en D (cela s'appelle *allumer* le siphon) : il voit le liquide monter dans cette nouvelle branche, et peut se retirer avant qu'il arrive à sa bouche.

PRESSE HYDRAULIQUE.

Cette machine offre de grands avantages dans les exploitations agricoles et industrielles ; elle est représentée dans les *fig.* 34, 35, 36, 37 et 38.

Fig. 38, élévation générale de la presse.
Fig. 35, coupe verticale.
Fig. 37, cuir embouti.
Fig. 36, pièces qui servent à ajuster le piston de la pompe.
Fig. 34, détails de la soupape de pression.

Il y a deux parties distinctes dans la presse hydraulique, savoir : une pompe aspirante et foulante qui donne la pression, et un plateau à piston qui la reçoit pour la transmettre immédiatement aux corps que l'on veut presser.

La pompe donne la pression au piston P au moyen du tube *tbu* (*fig.* 35 et 38). En levant le levier L (*fig.* 38), on soulève le piston S de la pompe (*fig.* 35); l'eau de la bache B (*fig.* 38) entre par la pomme d'arrosoir *r* (*fig.* 35), soulève la soupape *i* et passe sous le piston S; quand on presse sur le levier L, on fait redescendre le piston S, l'eau est refoulée, elle ferme la soupape *i*, gagne le conduit Z (*fig.* 35), soulève la soupape D et passe dans le tuyau *tbu* pour arriver dans le corps CC′ de la presse (*fig.* 35 et 38). Là elle presse fortement le piston P et le force à monter avec le plateau P′ qui presse à son tour les corps qui se trouvent entre sa surface et la plate-forme EF (*fig.* 38).

Si la section du piston S est la centième partie de la section du piston P, un effort de 1 kilogramme sur le premier produira, de bas en haut sur le second, une pression de 100 kilogrammes. Or, au moyen du levier L, un homme peut aisément exercer sur le piston S un effort de 300 kilogrammes : ainsi le piston peut aisément être poussé avec une puissance de 30 000 kilogrammes.

Tel est le principe fondamental de la presse hydraulique, nous allons indiquer maintenant comment on mesure les pressions et comment on parvient à éviter les fuites.

Les pressions se mesurent au moyen de la soupape G (*fig.* 35); on en voit les détails dans la *fig.* 34. Connaissant le poids *p*, sa distance *yf* au point d'appui *f*, la distance *xf* du point par lequel le levier presse sur la soupape, et enfin la section de la soupape, il est facile de calculer la pression qu'elle éprouve de la part du liquide, lorsque le levier *fy* est soulevé.

Pour éviter les fuites, on ajuste d'abord avec un soin particulier le piston S; les pièces qui servent à cet usage sont vues en grand dans la *fig.* 36; c'est la même disposition que dans les pompes de Marly, près de Versailles; c'est Bramah qui l'a résolue par l'heureuse invention du cuir embouti dont on voit une coupe dans la *fig.* 37. Ce cuir est disposé en *mm′* (*fig.* 35), dans un espace annulaire pratiqué à cet effet dans le corps CC′ de la presse. Il est facile de voir par sa forme et sa disposition qu'il ferme d'autant mieux que la pression est plus forte. La vis K sert à la dépression; lorsqu'on la détourne, le liquide revient du corps de la presse par le tube *ubt* et s'échappe par l'ouverture *v*.

DU MOUVEMENT DES GAZ.

Des Gazomètres. — Les gazomètres sont des appareils au moyen desquels on obtient des écoulements constants. L'écoulement con-

stant du gaz est produit par l'écoulement constant d'un liquide; rien n'est plus commode pour cet usage que le vase de Mariotte. On le dispose alors comme dans la *fig.* 39, *Pl. II.* Le grand col du ballon est mastiqué dans le réservoir du gaz; l'eau tombe par l'orifice *o* : s'il en arrive 20 litres en une seconde, il faut que 20 litres de gaz soient chassés dans le même temps par les orifices ou par les tuyaux d'écoulement. Pour appliquer ce principe aux gaz différents de l'air, on les recueille dans de grandes vessies que l'on enferme dans un second réservoir; l'air qui sort du premier réservoir arrive dans le second et exerce sur ses membranes élastiques une pression constante qui produit de même un écoulement constant.

Les grands gazomètres de l'éclairage sont construits sur un autre principe : un cylindre à un seul fond est renversé sur une grande citerne remplie d'eau. Ce cylindre est en feuilles minces de métal, et a, par exemple, 10 mètres de diamètre, contient 100 mètres cubes de gaz, et pèse, je suppose, 10 000 kilogrammes. Il n'enfonce pas dans l'eau puisqu'il est plein de gaz; seulement, il presse de tout son poids sur ce gaz intérieur, et le tient à une pression plus forte que la pression atmosphérique. Dans notre hypothèse, cet excès de pression serait de 10 000 kilogrammes sur une base de 10 mètres de rayon; ce qui fait à peu près une colonne d'eau de 13 centimètres. Si l'on conçoit maintenant que du fond de la citerne s'élève un tube, qui vienne d'une part s'ouvrir un peu au-dessus du niveau intérieur de l'eau pour communiquer avec le gaz du gazomètre, et qui s'en aille d'une autre part se subdiviser en une foule de ramifications terminées par des becs d'éclairage, on verra qu'il suffit de tourner un robinet pour éclairer une grande ville. L'écoulement du gaz sera constant, parce que le gazomètre ne fera qu'une petite perte de poids en s'enfonçant dans l'eau de la citerne ; au reste, on peut, avec des contrepoids, lui donner encore plus de régularité ou modérer sa pression. Pour remplir le gazomètre, on ferme le robinet de distribution, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre les cornues où se forme le gaz et le tube vertical qui s'élève du fond de la citerne au-dessus du niveau intérieur de l'eau.

POIDS SPÉCIFIQUE DES GAZ.

Nous avons vu que la pesanteur spécifique d'un corps est le rapport de son poids à son volume. L'objet qu'on se propose dans la recherche des densités est moins de pouvoir trouver combien pèse un corps sous un volume donné, que de pouvoir comparer entre elles les densités de tous les corps différents que nous présente la nature. On prend donc pour unité une densité connue, et l'on cherche combien de fois les autres la contiennent. L'unité que l'on choisit pour les gaz est la densité de l'air atmosphérique, parce que l'air se trouve partout, et que partout il se compose des mêmes éléments chimiques combinés dans la même proportion. L'unité que l'on choisit pour les autres corps est la densité de l'eau distillée, parce que l'eau se trouve aussi partout, et qu'il est facile, en la distillant, de la rendre parfaitement pure. Ensuite le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau

donne le moyen d'établir la comparaison entre les densités de tous les corps connus.

Densités des gaz. — A volume égal, les densités des corps sont entre elles comme leurs poids; ainsi, pour avoir les densités des gaz par rapport à l'air, il suffit de peser un volume d'air et un volume égal de tous les autres gaz à la même température et sous la même pression. On y parvient en prenant un grand ballon de 8 à 10 litres de capacité, que l'on pèse après y avoir fait le vide, et que l'on pèse ensuite après l'avoir rempli successivement d'air sec et des gaz de différente nature dont on veut avoir les densités. Comme il est impossible de faire le vide parfait, on tient compte, par le calcul, de la petite quantité d'air qui reste; et comme toutes les pesées peuvent ne se faire dans des circonstances exactement pareilles, il y a de nombreuses corrections à faire pour les variations de température, de pression et d'humidité de l'air extérieur.

Densité de l'eau distillée. — Tous les corps changent de volume à chaque instant par l'influence de la chaleur: aussi à chaque instant ils changent de densité. Mais dans la loi de ces variations l'eau présente une exception remarquable: à partir de o, lorsqu'on élève sa température, elle se retire sur elle-même au lieu de se dilater, et elle se retire de plus en plus, jusqu'à la température d'environ 4 degrés; ensuite, en la chauffant davantage, elle commence à éprouver une expansion, comme font tous les autres corps, et dès cet instant sa dilatation, croît jusqu'à l'ébullition. Vers la température de 4 degrés, l'eau éprouve donc un *maximum de contraction*. Ce phénomène est frappant lorsqu'on l'observe sur un thermomètre à eau, dont chaque degré occupe une assez grande étendue. Ce thermomètre descend comme celui à mercure, lorsqu'on les plonge ensemble dans un bain liquide qui est, par exemple, à 10 degrés, et que l'on refroidit peu à peu; mais aux approches du quatrième degré, le refroidissement augmentant, et le thermomètre à mercure continuant de descendre, on voit le thermomètre à eau qui remonte, comme si on le chauffait, et qui remonte ainsi jusqu'à la température de la glace. En poussant le refroidissement plus loin, l'eau du thermomètre se gèle et prend tout à coup un accroissement de volume très-considérable; on peut donc présumer qu'à partir de 4 degrés, les molécules liquides commencent à s'écarter l'une de l'autre, et qu'elles se préparent en quelque sorte à prendre les positions respectives qu'elles doivent avoir pour passer à l'etat solide. L'eau qui tient en dissolution quelques sels, ou d'autres substances étrangères, paraît présenter encore les propriétés du maximum de contraction et de l'accroissement de volume par la congélation; mais comme elle se gèle à une température plus basse que o, c'est aussi à une température plus basse que 4 degrés qu'elle éprouve son maximum de contraction. Ces phénomènes ne semblent d'abord que des exceptions fortuites et de peu d'importance, mais ils ont une grande influence sur la distribution de la chaleur dans l'étendue des mers et de tous les continents. C'est par là que dans les latitudes élevées, les rivières, les lacs et les mers peuvent rester liquides à une certaine profondeur; c'est par là que les êtres vivants qui peuplent les eaux peuvent se conserver dans

toutes les saisons et se perpétuer; c'est par là enfin qu'il s'établit une circulation de chaleur entre les pôles et l'équateur, et une température moyenne qui est plus modérée dans tous les climats.

FLUIDES INCOERCIBLES OU IMPONDÉRABLES.

Calorique. — A la cause inconnue de la sensation de la chaleur, on a donné le nom de *feu* ou de la matière de la chaleur. Lors de la réformation du langage chimique, on l'a appelé *calorique*, denomination généralement adoptée.

Le calorique est tellement subtil, que toutes les recherches des physiciens qui tendent à en reconnaître la matérialité, ont été jusqu'à ce jour sans succès : aussi l'existence du calorique comme substance matérielle est encore incertaine. Des physiciens d'un grand mérite l'ont même révoquée en doute, et ont admis que la chaleur n'est que l'effet d'un mouvement intérieur qui détermine le rapprochement ou l'écartement des molécules selon les circonstances. Nous adopterons l'hypothèse dans laquelle on admet la matérialité du calorique, parce qu'elle est plus commode pour l'explication des phénomènes.

Propriétés du calorique. — Le calorique est un fluide extrêmement subtil, invisible, impondérable, capable, quand il est libre, de se mouvoir sous forme de rayons à la manière de la lumière, qui tend à se mettre en équilibre dans tous les corps, les pénètre plus ou moins facilement, les dilate, les décompose, les fait passer de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état gazeux, qui peut s'en séparer et les ramener par là de l'état gazeux à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état solide; enfin il possède la propriété de se combiner en différentes proportions avec chacun d'eux pour les élever à la même température.

Calorique rayonnant. — Le calorique émane des différents corps sous la forme de rayons; on peut s'en assurer en plaçant autour d'un corps chaud, dans une position quelconque, un thermomètre sensible. Cet instrument manifeste, par la dilatation du liquide qu'il renferme, l'absorption du calorique. L'effet ne peut être attribué à la propagation par le milieu environnant, puisque la même transmission a lieu dans le vide et produit à la même distance le même effet, quelle que soit la position du thermomètre.

Réflexion du calorique à la surface des corps polis. — Le calorique échappé d'un foyer de chaleur sous la forme de rayon a la propriété de réfléchir à la surface des corps polis, en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Pour s'en convaincre, qu'on prenne, par exemple, un miroir plan; qu'on place au devant de lui ou sous un angle aigu, un tuyau de tôle, dans lequel on mettra quelques charbons allumés; qu'on détermine la direction présumée du rayon réfléchi, en prenant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, et que sur cette direction on place un thermomètre, on verra l'instrument monter promptement de plusieurs degrés, tandis qu'un autre thermomètre semblable placé hors de cette direction restera sensiblement stationnaire.

On peut faire l'expérience d'une autre manière : Qu'on dispose un corps en ignition en A vis-à-vis un miroir concave (*fig.* 40, *Pl. II*). Les

rayons calorifiques Aa, Ab, etc., échappés du corps A, se réfléchiront sur le milieu et iront se couper tous sensiblement en B; en sorte que si l'on place en ce point un corps combustible, de l'amadou par exemple, il s'enflammera très-promptement, tandis que le même effet n'aura pas lieu si on le place partout ailleurs, même plus près du corps A.

La position du foyer des rayons réfléchis est variable avec la position du corps en ignition. Si ce dernier se trouvait en B, les rayons directs deviendraient Bb, Ba, et les rayons réfléchis seraient aA, bA, etc., de sorte que le foyer de réflexion se trouvera alors en A, et qu'un corps placé en ce point s'échaufferait considérablement.

Les phénomènes qu'on obtient ici, en développant le calorique par l'ignition d'un corps, se présentent également lorsqu'on place le miroir concave de manière à recevoir les rayons du soleil. Le calorique émane des rayons de cet astre, lesquels transmis avec la lumière, se réfléchissent à la surface polie, et vont se réunir après la réflexion à un centre commun. Si l'on place en ce point un corps combustible, on le verra s'enflammer comme dans l'expérience précédente.

Absorption du calorique par les corps à surfaces ternes. — Lorsque les rayons du calorique, au lieu de tomber sur une surface polie, tombent sur une surface terne, ils sont en très-grande partie absorbés. Qu'on enduise, par exemple, le miroir de noir de fumée, et qu'on place également en A (*fig.* 40, *Pl. II*) un corps en ignition, on reconnaîtra en plaçant un miroir en B qu'il y a très-peu de rayons réfléchis; dans ce cas le miroir s'échauffera beaucoup plus rapidement que quand sa surface était brillante: en général, les corps dont la surface est grossièrement polie ou d'une couleur foncée, s'échauffent beaucoup plus promptement que ceux dont la surface est blanche et brillante. On remarque aussi que la faculté d'émettre le calorique est plus grande dans un corps dont la surface est terne que dans un autre de même nature, dont la surface est brillante; en sorte que, dans le premier cas, le corps se refroidit beaucoup plus vite que dans le second; il résulte d'expériences très-exactes que, dans des corps de même nature, la faculté émissive et la faculté absorbante suivent dans tous les cas la même loi.

Propagation du calorique à travers les corps. — L'expérience nous apprend que les rayons calorifiques solaires sont transmis à travers le verre aussi bien que les rayons lumineux; c'est ce que tout le monde peut éprouver en se plaçant derrière une vitre exposée au soleil. On a démontré qu'il en était de même du calorique émané des corps qui se trouvent portés à une chaleur obscure, pourvu que cette chaleur fût assez considérable et en général au-dessus de l'eau bouillante. Ces effets se produisent avec d'autant plus de facilité, que la température du corps soumis à l'expérience approche davantage de celle où il commence à se produire de la lumière; en sorte que les propriétés du calorique semblent se modifier graduellement jusqu'à devenir identiques avec celles du fluide lumineux.

Réfraction du calorique. — Lorsque le calorique rayonnant produit par un corps d'une température assez élevée arrive sur une substance diaphane dans une direction oblique, il pénètre ce corps et s'y réfracte plus ou moins suivant sa nature. Cette réfraction n'a pas cependant lieu comme dans un corps solide qui traverse un liquide, car le rayon

calorifique fait l'angle de réfraction plus petit que l'angle d'incidence : ce que l'on peut attribuer à l'attraction que le corps exerce sur le fluide. Si l'on présente au soleil une lentille de verre, les rayons du calorique, comme ceux de la lumière, se réfracteront et se réuniront ensemble en un point qu'on appelle *foyer*; de manière que si l'on place en ce point un corps combustible, de l'amadou par exemple, il s'enflammera promptement. Si l'on n'obtient pas identiquement les mêmes effets avec le feu de nos foyers, ou avec un corps porté à un degré de chaleur obscure même assez élevé, c'est parce que le centre d'émanation n'a pas assez d'activité; cependant il y a encore dans ce cas une réfraction de calorique, car la chaleur est réellement plus forte au foyer de la lentille, comme on peut s'en convaincre au moyen d'un thermomètre très-sensible.

Variations de chaleur d'une extrémité à l'autre du spectre solaire. — La réfraction des rayons calorifiques se manifeste encore d'une autre manière fort remarquable dans l'expérience par laquelle on décompose la lumière blanche en rayons colorés. Lorsqu'un faisceau de lumière solaire qui passe par un petit trou circulaire fait au volet d'une chambre tenue obscure, tombe sur un prisme triangulaire ABC (*fig.* 41, *Pl. II*), il se réfracte à l'intérieur du corps, puis il en sort et se réfracte de nouveau à l'extérieur : il acquiert alors des caractères particuliers; car ce n'est plus un faisceau blanc, mais un faisceau de particules colorées, dont chaque rayon subit une réfraction particulière. Toutes ces réfractions ont lieu dans un même sens transversal au prisme, et il en résulte que le faisceau se trouve considérablement dilaté dans cette direction, de sorte que si on le reçoit sur un plan à quelque distance, il donne une image allongée au lieu d'une image circulaire. Cette image est vivement colorée de diverses teintes, disposées par bandes transversales; les couleurs se succèdent dans l'ordre suivant : *rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet.* Le faisceau de molécules calorifiques qui accompagnent la lumière, présente un phénomène de même genre. Il est dilaté à sa sortie du prisme; et l'intensité de la chaleur dans les diverses bandes colorées diminue successivement depuis la bande colorée rouge où elle est au maximum, jusqu'au violet, à l'extrémité duquel elle est au minimum. Ces résultats remarquables nous prouvent que les rayons calorifiques sont soumis aux mêmes lois que la lumière. On parvient aussi à les obtenir, quoique très-difficilement, avec des corps d'une chaleur obscure très-intense.

DILATATION ET CONTRACTION DES CORPS PAR LES CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE.

Le calorique, en s'introduisant dans les corps à la faveur de leurs pores imperceptibles, produit sur eux des effets analogues à ceux que nous avons remarqués lors de l'introduction des liquides dans les corps solides. Ces corps augmentent de volume dans toutes leurs dimensions. Qu'on prenne une plaque de fer percée d'un trou, dans lequel entre avec précision un bouchon de fer; qu'on fasse chauffer ce bouchon et qu'on le présente au trou, on verra qu'il ne peut plus y

entrer. Si l'on prend un petit tube de verre terminé à une extrémité par une boule, qu'on y introduise un liquide quelconque, on verra, en le présentant au feu, la colonne liquide augmenter de longueur, et d'autant plus que la chaleur sera plus considérable. Il faut cependant remarquer que la petite colonne liquide diminue de hauteur au premier moment, mais cet effet est dû à ce que le verre se dilate, et qu'en conséquence la capacité de la boule devient plus grande. Après ce premier effet, le volume du liquide commence à augmenter. Si l'on prend une vessie aux trois quarts remplie d'eau froide et bien fermée, qu'on la présente au feu, on la verra se gonfler considérablement. Tous les corps se refroidissant diminuent de volume, et lorsqu'ils sont revenus à la température qu'ils possédaient avant l'expérience, ils ont repris le volume qu'ils avaient alors. Si on les refroidit davantage, ils diminuent encore de volume, et cela indéfiniment, d'après les connaisances actuelles.

Dilatation des solides. — Les corps solides sont très-peu dilatables, parce que la force de cohésion dont ils sont doués s'oppose à l'action du calorique en retenant les molécules les unes auprès des autres. Plus la force de cohésion est considérable, plus la dilatation pour un certain degré de chaleur doit être petite. On a cru, jusque dans ces derniers temps, que les corps solides se dilataient uniformément depuis zéro jusqu'à une température très-haute; c'est-à-dire qu'à quelque température que soit déjà un corps, l'addition d'un degré de chaleur le dilate toujours de la même quantité; mais il a été démontré par des expériences très-exactes, qu'il n'en est pas ainsi. La dilatation n'est pas la même entre chaque degré de chaleur; elle croît avec la température, en sorte que la variation est plus forte pour chaque degré compris entre 200 et 300 degrés qu'entre 100 et 200; plus forte entre ces deux derniers qu'entre 0 et 100, etc. Cet accroissement devient surtout très-sensible vers le temps de la fusion, dans les corps qui en sont susceptibles.

Les dilatations, déjà variables dans le même corps suivant le degré de température auquel on opère, varient aussi considérablement d'un corps à l'autre. On a fait à ce sujet beaucoup d'expériences dont les résultats ne sont pas toujours d'accord entre eux.

Dilatation des liquides. — Les liquides sont tous, aussi, inégalement dilatables : qu'on prenne, par exemple, plusieurs tubes de thermomètres égaux renfermant, l'un de l'esprit-de-vin, l'autre de l'eau, et l'autre du mercure; qu'on les plonge dans un vase rempli d'eau que l'on fera chauffer : on verra que l'esprit-de-vin s'échappera déjà par la partie supérieure du tube, lorsque l'eau en sera encore très-éloignée, et le mercure encore plus.

A mesure qu'un liquide s'échauffe, la force de cohésion de ses molécules diminue, et oppose dès lors moins de résistance à l'expansion que sollicite le calorique. Aussi, à diverses températures, l'addition de 1 degré de calorique n'occasionne-t-elle pas le même degré de dilatation. Plus un liquide approche du terme de l'ébullition, plus la dilatation qu'il éprouve par l'addition de 1 degré de chaleur est grande. Au contraire, plus la température est éloignée du terme de l'ébullition, plus la dilatation est petite. Le mercure, l'huile de lin,

présentent moins de variations que l'eau, l'alcool, etc., et c'est pour cela que le premier liquide est généralement employé aujourd'hui pour les thermomètres divisés en parties égales depuis o jusqu'à 100 degrés.

Dilatation des fluides aériformes. — Les fluides aériformes se dilatent tous également, et leur dilatation est uniforme et égale pour chaque degré de thermomètre, ce qui paraît tenir à ce que dans ces corps la force de cohésion étant zéro, rien ne peut balancer en même temps la force élastique du calorique. Il résulte des expériences faites par M. Gay-Lussac, que tous les fluides aériformes, soit gaz permanents, soit vapeurs, chauffés de o à 100 degrés se dilatent dans le rapport de 100 à 137,5; par conséquent, l'augmentation de volume est de 37,5, et, en divisant par 100, l'augmentation de volume pour chaque degré du thermomètre se trouve 0,375 ou 0,00375, en faisant le volume à la température zéro égal à l'unité.

Phénomènes résultant des variations de pesanteur spécifique suivant le degré de chaleur. — Lorsque, pour faire chauffer un liquide, on dispose la partie inférieure du vase qui le renferme sur un foyer de chaleur, les molécules liquides qui touchent le fond du vase s'échauffent les premières et se dilatent; elles acquièrent alors un degré de légèreté spécifique en vertu duquel elles s'élèvent à la surface; elles sont remplacées par les molécules plus froides qui arrivent de la partie supérieure. Si l'action de la chaleur est continue, il s'établit dans la masse liquide un mouvement de circulation au moyen duquel le calorique est charrié dans tous les points. Le liquide s'échauffe ainsi très-promptement, indépendamment de son plus ou moins de faculté conductrice. Pour observer le mouvement de circulation, il suffit de faire flotter, dans le liquide qu'on fait chauffer, de petits corps dont la pesanteur spécifique diffère peu de la sienne. On voit ces petits corps se mouvoir plus ou moins rapidement, les uns de haut en bas, les autres de bas en haut; il résulte de ce que nous avons dit, que la partie la plus chaude d'un liquide se trouve toujours vers la surface.

Dans un appartement où il y a du feu, l'air le plus chaud occupe la partie supérieure en vertu de la légèreté qu'il a acquise. S'il peut entrer de l'air frais par quelque endroit, il s'établit dans l'appartement deux courants en sens contraires, l'un d'air froid à la partie inférieure, l'autre d'air chaud à la partie supérieure; le premier se dirige vers le foyer, l'autre s'échappe au dehors. Tout le monde sait qu'étant auprès du feu, on sent sur les jambes un air froid qui se glisse par-dessous les portes. On peut se convaincre facilement de l'existence de deux courants, en plaçant près de la porte une bougie allumée sur le plancher et une autre à la partie supérieure : on verra leurs flammes agitées en sens contraires. Auprès des tuyaux d'un poêle, il y a toujours un courant ascendant d'air dilaté. C'est ce courant qui frappe les spirales de papier que les enfants suspendent au tuyau sur des fils de fer et les font tourner.

C'est l'air dilaté qui, en s'élevant dans le tuyau d'une cheminée, entraîne avec lui les fumées et les diverses substances qui s'échappent du combustible. On conçoit qu'il doit y avoir un certain rapport

entre la largeur du tuyau et le degré de chaleur qui se développe au foyer, pour que la construction soit parfaite. Il est bon, en général, que le tuyau soit très-étroit, parce qu'alors l'air dilaté s'échappe avec plus de vitesse.

THERMOMÈTRES.

C'est sur la propriété que possède le calorique de dilater tous les corps qu'est fondée la construction de tous les instruments dont on se sert pour évaluer les températures et les comparer entre elles.

Les thermomètres liquides sont ceux qui sont le plus en usage; on peut employer dans leur construction des liquides de diverses espèces; mais celui auquel on donne la préférence est le mercure : 1° parce qu'il ne s'attache pas aux parois du tube; 2° parce qu'il supporte, avant de bouillir, une plus haute température que les autres liquides; 3° qu'étant meilleur conducteur que beaucoup d'autres, il se met plus promptement et plus facilement en équilibre de température; 4° parce que les irrégularités qu'il manifeste dans la dilatation sont sensiblement compensées entre la température de la glace fondante et celle de l'eau bouillante, par les variations correspondantes du tube de verre.

Pour construire un thermomètre, il faut d'abord choisir un tube capillaire parfaitement cylindrique, afin qu'en le divisant en parties égales, chaque division ait la même capacité; on terminera ce tube par une ampoule ou par une spirale; puis on introduira le mercure, qu'on aura eu soin de bien purger d'air. Mais comme il serait impossible d'introduire ce liquide dans un tube si étroit au moyen d'un entonnoir, on chauffe l'ampoule pour dilater l'air qu'elle renferme et le faire sortir; on plonge ensuite l'extrémité ouverte dans du mercure bien pur, sec et chaud; ce liquide s'introduit en vertu de la pression de l'atmosphère à mesure que le tube se refroidit. Le tube ainsi rempli, on le chauffe assez fortement pour dilater le mercure et le faire sortir de manière à ce que le reste, étant revenu à la température ordinaire, ne remplisse qu'une partie du tube; on fond ce tube à l'extrémité pendant que le mercure dilaté s'élève encore jusqu'à son sommet, et on le ferme ainsi hermétiquement.

Il ne s'agit plus que de graduer le tube suivant l'espèce de thermomètre qu'on veut obtenir. En France et dans la plus grande partie de l'Europe, le thermomètre en usage a deux termes fixes, celui de la glace fondante, et celui de l'eau bouillante. Pour fixer ces deux termes, on plonge d'abord l'instrument dans l'eau à l'état de glace fondante, où on le maintient jusqu'à ce que l'équilibre de température soit bien établi, et l'on marque un trait où le mercure s'arrête. On plonge ensuite le tube dans l'eau bouillante ou plutôt dans la vapeur d'eau bouillante sous la pression atmosphérique de 763 millimètres, et l'on marque un nouveau trait à l'endroit où le mercure reste stationnaire : cela fait, si le tube est cylindrique, il ne reste qu'à diviser l'intervalle entre ces deux termes en un certain nombre de parties égales; on peut porter ensuite la même division au delà des points fixes. Chaque partie prend le nom de degré : les degrés

au-dessous de zéro s'expriment par le signe *moins;* ceux qui sont au-dessus, par le signe *plus*.

On ne prend pas partout les mêmes points fixes pour l'échelle thermométrique. Le thermomètre de Fahrenheit, dont on se sert en Angleterre, a pour point fixe inférieur le degré de congélation forcée par le mélange de sel ammoniac et glace, et pour point fixe supérieur le degré de l'eau bouillante. Le thermomètre de Delisle, dont on se sert en Russie, n'a de point fixe que celui de l'eau bouillante. Ces différentes manières de fixer les points de départ, ainsi que les divisions des échelles, constituent la différence des thermomètres les plus usités et qui sont au nombre de quatre.

Thermomètre de Réaumur. — Le thermomètre de Réaumur, qu'on devrait appeler thermomètre de Deluc, parce que celui de Réaumur, qui était à l'esprit-de-vin, diffère totalement de celui qui porte aujourd'hui ce nom, est divisé en 80 parties égales, depuis le terme de la glace fondante, où se trouve le zéro, jusqu'à celui de l'eau bouillante.

Thermomètre de Celsius. — Le thermomètre de Celsius ou centigrade, usité depuis longtemps en Suède, et actuellement en France, est divisé en 100 parties entre les deux mêmes points fixes.

Thermomètre de Fahrenheit. — Dans le thermomètre de Fahrenheit, l'intervalle entre les deux points fixes est divisé en 212 parties. Le zéro de notre thermomètre coïncide avec le 32[e] degré de celui-ci; ce qui donne 180 degrés depuis ce terme jusqu'à celui de l'eau bouillante.

Thermomètre de Delisle. — Dans le thermomètre de Delisle, le zéro se trouve au point fixe qui est le terme de l'eau bouillante; les degrés au-dessous sont des dix millièmes de la capacité de la boule et du tube. Notre zéro correspond à 150 degrés de cette échelle descendante.

SOURCES DE CHALEUR.

Les principales sources de la chaleur sont le soleil, le changement d'état des corps, la combinaison, la percussion, le frottement. Les combinaisons chimiques sont une source puissante de chaleur; dans toutes les combinaisons en général, il y a dégagement de calorique et souvent dégagement de lumière. Tous les gaz dégagent de la chaleur par la compression; réciproquement, tous les gaz produisent du froid par l'expansion. Pour s'en assurer, on suspend un thermomètre au milieu d'une cloche ou d'un ballon dont on aspire l'air par la machine pneumatique. Dès le premier coup de piston, le thermomètre descend; s'il a peu de masse et une grande sensibilité, on peut le faire descendre ainsi à 8 ou à 10 degrés au-dessous de la température ambiante. Les autres gaz produisent des effets analogues.

Ce double effet se produit dans les appareils à gaz portatif pour l'éclairage; ces appareils sont de forts cylindres, de 2 à 3 pieds de long, terminés aux deux bouts par des hémisphères; lorsqu'on les met en communication avec le gazomètre pour les remplir sous une trentaine d'atmosphères, on observe un abaissement de température à l'extrémité par laquelle entre le gaz, et une élévation de température à l'extrémité opposée.

Ces deux phénomènes de production et d'absorption de chaleur s'expliquent d'une manière satisfaisante par les changements de capacité qui accompagnent dans les gaz les changements de densité.

Du calorique rayonnant.

Le calorique rayonnant est celui qui passe à travers certains corps, comme la lumière passe à travers les corps diaphanes. La chaleur solaire ne vient frapper la terre qu'après avoir traversé toute la couche atmosphérique; et si l'air s'échauffe pendant un jour serein, tout le monde sait que les corps s'échauffent aussi, et qu'en général leur température est beaucoup plus haute que celle de l'air; donc, une partie de la chaleur du soleil traverse, comme la lumière, toute l'épaisseur de l'atmosphère sans être absorbée. Les corps qui sont échauffés jusqu'à donner de la lumière, ont en même temps la propriété d'émettre autour d'eux, dans tous les sens, du calorique qui passe à travers l'air, comme la lumière passe à travers les milieux diaphanes; c'est d'après cette analogie que l'on dit, en parlant de la chaleur, *des rayons de calorique* ou des rayons de chaleur.

La chaleur obscure est rayonnante comme la chaleur lumineuse; quand un boulet rouge de feu tombe par le refroidissement du rouge blanc au rouge cerise, puis au rouge et ensuite au rouge obscur, il ne cesse pas pour cela de donner à distance l'impression de la chaleur, et de lancer des rayons de chaleur de toutes parts et à de grandes distances. Le même phénomène se reproduit sans cesse autour de tous les corps, quelle que soit leur température; un vase rempli d'eau bouillante rayonne comme un boulet rouge.

Pour étudier le calorique rayonnant, on se sert avec avantage d'un thermomètre particulier que l'on appelle *thermoscope*.

Thermoscope. — Le thermoscope est une espèce de thermomètre à air, mais qui ne donne que les différences de température. C'est un tube de verre terminé par deux boules remplies d'air. Il renferme une goutte de liqueur colorée *a* (*fig.* 42, *Pl. II*) qu'on nomme *index*. Si les deux boules sont également échauffées, l'air se trouvant au même degré d'élasticité, l'index reste stationnaire; mais si l'une des deux boules est plus échauffée que l'autre, l'index est poussé du côté de la boule la plus froide en vertu de la force élastique. Cet instrument est extrêmement sensible et très-propre à indiquer les plus faibles degrés de chaleur accumulés dans un point avant que l'air environnant en soit affecté. En présentant la main à une boule à 1 mètre de distance, on voit à l'instant l'index se porter du côté opposé. L'effet devient encore plus sensible, si la boule à laquelle on présente la main est enduite d'une matière noire. Leslie, qui a inventé un instrument semblable, à la forme près, pour les expériences qu'il a faites sur le calorique, a employé depuis cet instrument comme photomètre, en évaluant ainsi la vivacité de la lumière par le calorique rayonnant qui semble lui être proportionnel.

Calorique spécifique.

Des quantités de chaleur et des moyens de les comparer. — Nous admettons comme principe que, pour produire un même effet, il faut

toujours une même quantité de chaleur. Par exemple, 1 kilogramme de fer étant à la température de 10 degrés, s'il passe d'une manière quelconque à la température de 11 degrés, nous admettons qu'il reçoit toujours la même quantité de chaleur, soit que celle-ci lui vienne du soleil ou d'un foyer, soit qu'elle lui vienne du contact ou du rayonnement d'un corps quelconque. De même 1 kilogramme de glace à 0 prend toujours la même quantité de chaleur pour se fondre, quelles que soient les circonstances de la fusion, et 1 kilogramme d'eau à 100 degrés prend toujours la même quantité de chaleur pour se vaporiser.

D'après ce principe fondamental, nous pourrons comparer des quantités de chaleur données, toutes les fois que nous pourrons les appliquer successivement à produire un même effet, c'est-à-dire à élever la température d'un corps, ou à liquéfier un solide, ou à vaporiser un liquide. Mais comme il faut pour cela que le calorique sorte des corps où il se trouve, pour passer dans les corps où il doit produire un de ces effets, il en résulte que nous ne pouvons jamais comparer les quantités totales ou absolues de calorique que possèdent les corps; car nous ne pouvons jamais les épuiser de tout le calorique qu'ils contiennent. Nos mesures sont restreintes aux seules quantités de chaleur que nous pouvons faire sortir des corps.

On dit qu'une substance a plus ou moins de *capacité pour la chaleur*, suivant qu'elle exige plus ou moins de chaleur pour éprouver un changement de température donné, un changement de 1 degré par exemple; et cette quantité de chaleur s'appelle elle-même la *chaleur spécifique* de la substance. Sa capacité sera constante lorsqu'à poids égal, il faudra des quantités égales de chaleur pour élever sa température de 1 degré en un point quelconque de l'échelle thermométrique, c'est-à-dire pour la faire passer de 0 à 1 degré, de 1 degré à 2 degrés et de 100 à 101 degrés, etc.; ainsi le fer, par exemple, n'a pas une *capacité constante*, mais une capacité *variable* et *croissante*, parce qu'un kilogramme de fer exige une certaine quantité de chaleur pour passer de 0 à 1 degré; il en exige un peu plus pour passer de 100 à 101 degrés, plus encore pour passer de 200 à 201, etc. En général, le rapport des capacités de deux substances n'est autre chose que le rapport de leurs chaleurs spécifiques, c'est-à-dire le rapport des quantités de chaleur qu'elles prennent à poids égal et au même degré, pour éprouver des changements égaux de température. On a coutume de rapporter toutes les capacités à celle de l'eau prise pour unité; ainsi, quand on dit que la capacité d'une substance est 2, 3, 4, etc., cela signifie que sa capacité est 2 fois, 3 fois ou 4 fois celle de l'eau. On dirait de la même manière et dans le même sens que la chaleur spécifique d'un corps est 2, 3, 4, etc. D'après ces définitions, il sera facile de comprendre les méthodes et les instruments que l'on emploie pour déterminer les capacités ou les chaleurs spécifiques de différents corps.

Pour déterminer les capacités des différents corps, on les chauffe tous successivement à la même température, et l'on recueille les quantités d'eau qu'ils fournissent en retombant à la température 0. S'ils ont tous le même poids, leurs capacités sont comme les quantités d'eau qui s'écoulent; sinon il faut tenir compte du rapport des poids.

Capacité du calorique. — Pendant l'équilibre de température, le ca-

lorique se distribue uniformément entre les corps homogènes ; ainsi, en mélanţ ensemble 1 kilogramme d'eau à 34 degrés et 1 kilogramme d'eau à 10 degrés, on obtient après le mélange 2 kilogrammes de liquide à la température moyenne de 22 degrés. En répétant cette expérience entre d'autres substances homogènes et au même état, on obtient des résultats semblables. Mais lorsqu'on mêle ensemble des corps hétérogènes, le calorique ne se distribue pas uniformément. Si l'on met en contact 1 kilogramme d'eau à 34 degrés et 1 kilogramme de mercure à 0 degré, l'eau cédera du calorique au métal, jusqu'à ce que l'équilibre se soit établi. Or, à ce terme, un thermomètre placé au milieu de l'un ou de l'autre corps marque 33 degrés : d'où il suit que la température du mercure s'est élevée de 33 degrés, quoiqu'il n'ait reçu que la quantité de calorique nécessaire pour élever la température de l'eau de 1 degré. C'est ce phénomène qu'on désigne en disant que l'eau a une plus grande capacité de calorique que le mercure. Tous les corps sont dans le même cas ; chacun d'eux a une disposition particulière à prendre plus ou moins de calorique pour élever sa température. C'est cette disposition qu'on désigne par l'expression de *capacité du calorique*.

Cette variation de capacité de calorique se manifeste même entre des corps de même nature qui se trouvent à différents états. Ainsi l'eau paraît avoir plus de capacité de calorique à l'état liquide qu'à l'état de glace. En effet, si, en faisant abstraction des capacités de calorique, on cherchait quelle devrait être la température résultante d'un mélange de 1 kilogramme de glace à — 10 degrés et de 1 kilogramme d'eau à 90 degrés, on dirait : il faut 75 degrés de chaleur pour faire passer 1 kilogramme de glace de 0 degré à 0 degré liquide ; il faut de plus 10 degrés de calorique pour faire arriver la glace de — 10 degrés à 0 degré : donc en tout 85 degrés ; il resterait ainsi 5 degrés de chaleur à partager entre les 2 kilogrammes liquides qui se trouveraient dès lors à 2 $\frac{1}{2}$ degrés. Mais il n'en est pas ainsi, car la température résultante est de 3 degrés, de sorte qu'après la fusion il resterait 6 degrés de chaleur, au lieu de 5, à partager entre les 2 kilogrammes. Or ce n'est pas sur la quantité de calorique nécessaire à la fusion de la glace qu'on peut rien retrancher, puisque l'expérience prouve qu'elle est toujours de 75 degrés : ce ne peut donc être que sur le calorique nécessaire pour faire passer la glace de — 10 degrés à 0 degré ; il est clair que la glace n'a eu besoin que de 9 degrés de chaleur pour être élevée d'une température de 10 degrés.

On pourrait croire aussi que les capacités de calorique des corps varient avec la température ; en effet, on a fait voir que dans les corps solides, les capacités de calorique vont en croissant à mesure que la température s'élève : on a observé le même phénomène dans le mercure, et il est probable qu'il en est de même dans les autres liquides ; mais il est à remarquer que les corps se dilatent à mesure que la température s'élève, et que les dilatabilités sont croissantes, en sorte que l'accroissement de capacité pourrait en dépendre ; et ce qui tendrait à le faire croire, c'est que les métaux dont la dilatation suit la loi la plus rapide, sont aussi ceux dont la capacité du calorique subit les plus grandes variations.

Calorimètres. — On peut parvenir de diverses manières à déterminer le calorique spécifique des différents corps. La méthode des mélanges a été employée par plusieurs auteurs : elle consiste à mêler ensemble des corps à une température et un poids connus. On peut se servir en général d'eau pour tous les corps sur lesquels ce liquide n'a aucune action; et pour ceux que l'eau est susceptible d'attaquer, on peut prendre un autre liquide dont le calorique spécifique soit connu. C'est un procédé comparable à celui que nous avons indiqué précédemment pour avoir la pesanteur spécifique des corps solubles dans l'eau.

Dans cette méthode, il faut prendre beaucoup de précautions pour obtenir des résultats exacts; il faut avoir égard au calorique que la substance du vase qu'on emploie enlève ou communique au liquide, à celui qui est dérobé par l'air, et par les corps en contact; il faut avoir soin que le mélange se trouve dans tous les points à la même température.

On doit à Lavoisier et à Laplace une méthode différente qui est peut-être susceptible de plus d'exactitude, parce que les causes d'erreur sont moins nombreuses; elle est fondée sur l'observation de la quantité de chaleur que la glace emploie pour passer à l'état liquide. On sait que 1 kilogramme d'eau à 75 degrés fond exactement 1 kilogramme de glace et qu'il en résulte une masse liquide à 0 degré; or, si 1 kilogramme d'un autre corps à 75 degrés ne fond qu'un demi-kilogramme ou un tiers, etc., de glace, on en conclura que les chaleurs spécifiques de ces nouveaux corps sont $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, etc.

Cette manière d'annoncer la méthode semble supposer qu'il faut toujours ramener les corps au même poids et à la température de 75 degrés, mais il est facile en employant un corps d'un poids et d'une température quelconque, de ramener par un calcul fort simple les résultats à ce qu'ils seraient dans l'autre cas. En effet, soit un corps à 18 degrés et pesant 3 kilogrammes; supposons qu'il fonde $\frac{1}{2}$ kilogramme de glace en passant à 0; en prenant le tiers de cette quantité, on aura $\frac{1}{6}$ pour le poids de la glace fondue par 1 kilogramme à 18 degrés; divisant ensuite par 18, on aura $\frac{1}{108}$ pour la quantité de glace fondue par 1 kilogramme de ce corps à 1 degré, ou, réduisant en décimales, on aura 0,00926; si l'on multiplie par 75 degrés on aura ce qu'il doit fondre à cette température, c'est-à-dire 0,6945 qui en sera la chaleur spécifique rapportée à celle de l'eau.

L'instrument employé par Lavoisier et Laplace se compose de trois cavités : la première *aaa* est un grillage de fer destiné à placer le corps (*fig.* 43, *Pl. II*); la seconde *ce* est destinée à mettre de la glace pilée à zéro, qui se trouve dès lors en contact avec le corps : l'eau qui se forme à mesure que la glace se fond est portée au dehors par le canal C; une troisième cavité *cc* est destinée aussi à mettre de la glace pilée qui empêche la chaleur extérieure de pénétrer jusqu'à la glace de la cavité précédente; la paroi étant exactement continue, l'eau qui

provient de l'action de la température de l'air ne peut se mêler avec celle qui provient du calorique abandonné par le corps : elle s'écoule par le conduit H. En récoltant donc l'eau qui s'écoule par le tuyau C et en en prenant le poids, on peut avoir facilement le rapport de capacité de calorique du corps employé avec l'eau et les autres corps.

Si le corps dont on veut avoir le calorique spécifique est solide et sans action sur l'eau, il suffit de le placer dans la première cavité; s'il est liquide ou gazeux, ou s'il a une action chimique sur l'eau, il suffit de l'enfermer dans un vase d'une matière dont on connaisse déjà par des expériences préalables le calorique spécifique. On soustrait alors de la quantité de glace fondue celle qui doit l'avoir été par le vase.

De la conducibilité.

La conducibilité est la propriété dont jouissent les corps d'absorber la chaleur et de la répandre dans leur masse.

Conducibilité des solides. — Lorsqu'une barre de fer prismatique très-longue est plongée dans un bain de chaleur par une de ses extrémités, toutes ses sections, diversement éloignées du bain, prennent au-dessus de l'air ambiant des températures différentes; et quand l'équilibre est établi, chacune ayant la chaleur qu'elle doit conserver, on observe cette loi remarquable que *pour des distances au bain croissant en progression arithmétique, les excès de température décroissent en progression géométrique*. Cette loi n'a été vérifiée que pour des températures qui n'étaient pas très-hautes. On peut dire toutefois que les rapports de conducibilité propre auxquels on parvient ne sont généralement que des approximations.

Conducibilité des liquides. — Les changements de densité, qui accompagnent les changements de température, produisent dans les liquides des mouvements continuels qui en mélangent toutes les parties; aussitôt que des molécules de la masse deviennent plus denses ou plus légères, elles tombent ou elles s'élèvent, et toutes les molécules qu'elles rencontrent participent plus ou moins à leurs températures et à leurs mouvements. Ces phénomènes intérieurs des masses liquides peuvent être rendus sensibles par l'expérience suivante : on mêle dans de l'eau des parcelles visibles, ayant à peu près la même densité qu'elle, par exemple, de la sciure de chêne ou de buis, et ensuite on la fait chauffer ou refroidir dans une cloche à minces parois. La température ambiante étant de 15 à 20 degrés, le refroidissement de la partie inférieure détermine des courants descendants contre les parois, et au milieu de la masse un courant ascendant : le refroidissement de la partie supérieure produirait le même effet. Au contraire, le réchauffement de la partie inférieure produit des courants ascendants contre les parois et un courant descendant au milieu. Toute la masse participe bientôt à l'abaissement ou à l'élévation de température, et il est visible que c'est par mélange bien plus que par conducibilité. Cependant, si l'on échauffe la masse par le haut, les molécules réchauffées ayant la place qui convient à leur densité, nul mouvement ne se manifeste, et ce n'est que difficilement que la chaleur se propage de couche en couche à travers les molécules immobiles du liquide.

Conductibilité des gaz. — Les gaz étant plus dilatables encore et plus mobiles que ne sont les liquides, on conçoit que les changements de température, dans quelques points de leur masse, y produisent des courants plus nombreux et des mouvements plus rapides. Ainsi la conducibilité des gaz est encore plus difficile à observer que celle des liquides; cependant toutes les expériences s'accordent à montrer qu'elle est aussi très-faible, et que la chaleur ne passe que très-lentement de molécule à molécule dans les couches qui sont en repos.

Cette propriété est mise à profit dans les arts : pour conserver la chaleur dans une enceinte ou pour l'empêcher d'y pénétrer, il suffit de faire deux enveloppes entre lesquelles on enferme hermétiquement une couche d'air de 1 à 2 pouces d'épaisseur, dont on gêne les mouvements par quelques brins de paille, ou par quelque autre substance filamenteuse.

Changements d'état des corps.

Calorique combiné — Calorique latent. — On peut remarquer que quand l'équilibre de température est établi, les pores de tous les corps sont remplis de calorique qui se trouve partout au même degré d'élasticité. Or, si dans un corps on vient à augmenter l'étendue des pores par la dilatation, le calorique se dilate aussi, et bientôt l'équilibre est rompu : dès lors les corps en contact doivent perdre de leur calorique, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. Lorsque, au lieu de dilater un gaz, on vient à le comprimer, il arrive précisément le contraire de ce que nous venons de voir, on diminue par la compression l'étendue des pores : dès lors le calorique acquérant plus d'élasticité qu'il n'en possède dans les corps environnants, doit s'échapper et manifester sa présence par une élévation de température.

Puisque le calorique s'insinuant dans les corps provoque l'écartement de leurs particules, on peut, en étendant un peu le résultat de cette observation, concevoir mécaniquement la fusion des corps et leur passage à l'état de vapeur. Dans ce cas, on concevrait que les corps sont à l'état solide, à l'état liquide, à l'état de fluide aériforme, suivant le rapport entre la force de cohésion qui unit leurs particules intégrantes, et la force répulsive du calorique. Lorsque cette dernière force l'emporte sur l'autre, les corps sont liquides ou aériformes : liquides, lorsque les molécules se trouvent portées vers les limites de leur sphère d'activité de cohésion; aériformes, lorsqu'elles se trouvent au delà. Cette manière mécanique d'envisager le phénomène, adoptée par plusieurs physiciens, peut avoir des avantages, mais elle ne rend pas facilement raison de diverses circonstances qui accompagnent le changement d'état des corps. Ces circonstances dans l'hypothèse de la matérialité semblent plutôt conduire à concevoir une combinaison réelle du calorique avec les corps.

Fusion et gazéification envisagées comme des combinaisons chimiques du calorique. — On trouve par expérience que dans le passage d'un corps solide à l'état liquide, ou d'un liquide à l'état de fluide, il y a une quantité considérable de calorique qui se trouve absorbée, et qui n'a plus aucune influence pour élever la température. Si, comme

nous l'avons déjà dit, on mêle ensemble 1 kilogramme d'eau à 75 degrés et 1 kilogramme de glace à 0 degré, on obtient 2 kilogrammes de liquide à 0 degré; donc les 75 degrés de chaleur ont été employés en entier pour fondre le corps sans avoir aucune influence sur la température.

Cette expérience semble conduire naturellement à adopter l'idée d'une combinaison des corps avec le calorique, qui perd alors la propriété d'échauffer, précisément comme les corps qui se combinent entre eux perdent ordinairement leurs propriétés individuelles.

Il en résulte de nouveaux corps dont la température peut être élevée ou abaissée lorsqu'une certaine quantité de calorique libre vient à leur être ajoutée ou à leur être enlevée. L'état liquide doit être alors considéré comme une certaine combinaison définie d'un corps solide avec le fluide calorique, et l'état aériforme comme une combinaison d'un autre ordre. D'après cette manière d'envisager le phénomène, nous adopterons les expressions *calorique combiné* et *calorique libre* qui indiquent à l'instant l'état où se trouve le fluide calorique dans un corps; mais la plupart des physiciens, n'admettant pas de combinaison, ont adopté d'autres expressions; ils désignent sous le nom de *calorique latent* la quantité de fluide calorique qui peut être absorbée par un corps sans qu'il en résulte aucune inflence sur la température, et qui est, en quelque sorte, uniquement employée à sa dilatation; ils désignent, au contraire, sous le nom de *calorique sensible,* celui qui manifeste sa présence dans un corps par une élévation sensible de température.

Fusion des corps. — A mesure que le calorique s'accumule dans un corps solide, il en écarte les particules et diminue, par conséquent, la force de cohésion. Lorsque ce corps est échauffé à un certain degré plus ou moins élevé suivant sa nature, il se trouve disposé à entrer en combinaison avec le calorique, il en absorbe alors une quantité plus ou moins grande et passe à l'état liquide.

Différents degrés de fusibilité des corps. — Tous les corps n'entrent pas en fusion au même degré de chaleur : ce qu'on peut attribuer à la force de cohésion qui unit leurs particules, et qui exige une température plus ou moins élevée, pour être balancée suffisamment et permettre la combinaison. Il y a des corps, comme le platine, qui ne peuvent être fondus que par la chaleur la plus violente qu'on puisse produire; il en est d'autres qui sont absolument infusibles, comme le charbon.

Abaissement de température que produit la fusion d'un corps dans ceux qui l'environnent. — Toutes les fois qu'un corps solide passe à l'état liquide, il doit y avoir un abaissement de température dans les corps environnants. Aussi, lorsqu'on laisse fondre un morceau de glace dans sa main, éprouve-t-on un froid assez vif, parce que la glace, pour passer à l'état liquide, dérobe du calorique à tout ce qui l'entoure, et par conséquent à la main avec laquelle elle se trouve en contact.

Retour des liquides à l'état solide. — Lorsqu'un corps a été converti en liquide, le calorique qu'il absorbe de nouveau pour se mettre en équilibre avec les corps environnants, élève sa tempé-

rature et le dilate successivement; mais lorsque le corps liquide se trouve en présence d'autres corps plus froids, il cède son calorique; s'il arrive qu'après l'établissement d'équilibre le corps se trouve aussi au degré de chaleur nécessaire à la fusion, il conserve son état : mais s'il se trouve au-dessous, l'attraction de cohésion devenant prépondérante, il se solidifie et laisse à l'état de liberté tout le calorique qui le tenait en solution; ce fluide manifeste alors son action sur tous les corps environnants.

On sait combien les métaux fondus laissent échapper de calorique en passant à l'état solide. On peut se convaincre également que l'eau en passant à l'état de glace laisse échapper beaucoup de ce fluide : qu'on prenne, par exemple, un vase rempli d'eau pure, dans laquelle on plonge un thermomètre; qu'on entoure ce vase d'un mélange frigorifique : le liquide étant parfaitement tranquille se refroidira sans geler jusqu'à quelques degrés au-dessous de zéro; qu'on imprime alors au vase un léger mouvement de vibration, une partie du liquide passera aussitôt à l'état de glace, et l'on remarquera que la température du liquide restant s'élève à o degré, ce qui ne peut provenir que du calorique mis à l'état de liberté par la solidification d'une partie de l'eau.

Passage des liquides à l'état aériforme. — Lorsqu'un solide a été converti en liquide, le calorique qu'il absorbe pour se mettre en équilibre avec les corps environnants, élève sa température et le dilate successivement. Mais bientôt une nouvelle portion de calorique se combine avec quelques-unes de ses molécules, et les fait passer à l'état aériforme, de sorte que ce liquide s'évapore successivement. Il paraît, en général, que les corps qui sont habituellement liquides, donnent de la vapeur à toutes les températures : c'est ce que tout le monde a pu observer à l'égard de l'éther, de l'esprit-de-vin, de l'eau, etc., qui diminuent assez rapidement de poids, lorsqu'ils sont exposés à l'air dans des vases ouverts. Ces différents liquides sont plus volatils les uns que les autres : c'est sans doute parce qu'ils exigent plus de calorique les uns que les autres pour passer à l'état aériforme.

Évaporation. — Lorsqu'un des corps habituellement liquides se trouve placé dans un espace vide (sous une cloche privée d'air), il se forme subitement une certaine quantité de vapeur, qui varie suivant l'espace, suivant la température et suivant la nature du liquide.

A une température donnée, il ne se développe dans un espace donné qu'une certaine quantité de vapeur : à peine est-elle formée, que l'évaporation s'arrête si la température reste fixe; mais si l'espace vient à augmenter, et s'il croît par exemple comme les nombres 1, 2, 3, la quantité de vapeur augmente de la même manière : si l'espace devenait infini, la quantité de vapeur le deviendrait également, et bientôt il se formerait une atmosphère qui retarderait l'évaporation comme le fait l'atmosphère terrestre. Lorsqu'un espace est rempli de toute la vapeur possible, si l'on vient à le diminuer, une partie de la vapeur repasse à l'état liquide, et il n'en reste que ce que le nouvel espace peut renfermer à la température ordinaire.

L'espace restant le même, la quantité de vapeur qui s'y développe

croît avec la température; mais celle-ci venant à croître comme les nombres 1, 2, 3, l'évaporation augmente dans un rapport beaucoup plus grand, en sorte qu'il s'évapore beaucoup plus de ce liquide de 10 à 20 degrés que de 0 à 1 degré.

L'expérience nous apprend que tous les liquides ne donnent pas la même quantité de vapeur au même degré de température, c'est-à-dire que tous les liquides ne sont pas également volatils. L'éther donne une vapeur plus dense que l'eau; l'eau en donne une plus dense que le mercure.

Quant aux corps qui ne deviennent liquides qu'à des températures élevées, on ignore s'il leur faut ensuite beaucoup de chaleur pour s'évaporer d'une manière sensible; les expériences ayant été faites et ne pouvant l'être que dans des vases ouverts, le corps se combine bientôt avec l'oxygène de l'atmosphère. On sait cependant que les corps peu oxydables, comme l'argent et l'or, se volatilisent en partie à une très-haute température.

Evaporation dans un milieu aériforme d'une certaine densité. — Lorsque le liquide en évaporation est environné d'un fluide aériforme qui n'a pas d'action sur la vapeur, l'évaporation se fait avec plus de lenteur que dans le vide, et d'autant plus lentement que le fluide ambiant est plus dense; mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que dans un espace donné, occupé déjà par un fluide aériforme d'une densité quelconque et à une température déterminée, il se dégage précisément autant de vapeur que dans le vide; d'où il faut conclure que le fluide n'exerce aucune pression sur la vapeur. Tels sont les résultats obtenus par Saussure, Deluc, etc. On peut conclure de ce qui précède que l'évaporation d'un liquide est entièrement due au calorique, et que la présence ou l'absence de l'air n'influe en aucune manière sur la quantité de vapeur produite. Il y a cette seule différence, que dans le vide la vapeur se développe comme instantanément, tandis que dans un milieu résistant le temps nécessaire est plus ou moins long : ce qui vient de l'obstacle mécanique que le fluide ambiant oppose à la dissémination des particules de vapeur entre les siennes propres; cette dissémination ne peut avoir lieu qu'à l'aide des nombreux interstices dont l'air est criblé.

Air mélangé de vapeur. — L'air mélangé de vapeur est plus léger que l'air atmosphérique. Il résulte des expériences de Saussure que la pesanteur spécifique de la vapeur sous la pression moyenne de l'atmosphère est à celle de l'air dans le rapport de 10 à 14. Gay-Lussac a trouvé ce rapport de 10 à 16; il suit de là que l'air mélangé de vapeur est plus léger que l'air sec à égalité de densité : aussi dans le temps où l'atmosphère est chargée de vapeur aqueuse, le baromètre se tient-il plus bas que lorsqu'elle est sèche; mais cette circonstance ne paraît nullement indiquer la pluie, comme on le croit ordinairement.

Ebullition des divers liquides. — Malgré l'obstacle que les fluides aériformes environnants opposent à l'évaporation, il arrive pourtant un moment où la vapeur se dégage aussi rapidement dans un milieu aériforme d'une densité quelconque que dans le vide; c'est lorsque la température est assez élevée pour que la vapeur qui se forme se trouve

au degré d'élasticité du fluide ambiant; c'est à ce point que le liquide entre en ébullition. Lorsqu'on fait bouillir un liquide transparent dans un vase de verre, on voit de grosses bulles de vapeur se former à l'endroit où la chaleur est particulièrement appliquée; ces bulles s'élèvent à travers le liquide, viennent crever à la surface, et produisent ce mouvement violent si connu de tout le monde sous le nom d'*ébullition*.

Les petites bulles qui se dégagent de l'eau avant l'ébullition et qui produisent ce qu'on nomme un *frémissement*, sont dues à l'air contenu dans le liquide qui se dilate par la chaleur. L'eau distillée, l'eau qui provient de la fonte de la glace ne produiraient pas cet effet.

L'expérience prouve que sous la pression moyenne de l'atmosphère tous les liquides ne commencent pas à bouillir au même degré de température; ceux qui sont les plus volatils bouillent le plus promptement. L'éther nitrique, l'éther muriatique, par exemple, sont si volatils, que la chaleur seule de la main suffit pour les faire bouillir.

Calorique combiné dans le passage d'un liquide à l'état de vapeur. — La quantité de calorique que la vapeur absorbe en se formant au moment de l'ébullition est plus ou moins considérable sans doute, suivant les divers liquides; mais à cet égard on n'a guère d'expérience que sur l'eau. On peut calculer cette quantité de calorique de diverses manières. Suivant quelques physiciens, l'eau, en s'évaporant à la température de 100 degrés, absorbe une quantité de calorique de plus de cinq fois et demie ce qu'il en faut pour l'élever de 0 à 100 degrés.

Froid produit par la conversion des liquides en fluides aériformes. — D'après tout ce que nous venons de dire, toutes les fois qu'un liquide passe à l'état fluide aériforme, il absorbe du calorique et en prend nécessairement à tout ce qui l'environne, par conséquent il doit y avoir production de froid pour les corps en contact. En enduisant la boule d'un thermomètre d'une couche de liquide facilement évaporable, surtout l'éther, on voit bientôt la liqueur descendre considérablement vers zéro, parce que le liquide en s'évaporant enlève du calorique à la boule avec laquelle il est en contact.

Retour des fluides aériformes à l'état liquide ou solide. — Lorsque la température d'un fluide aériforme est abaissée suffisamment pour que l'attraction des molécules du liquide qui lui sert de base devienne prépondérante, ce fluide repasse à l'état liquide et le calorique est mis à nu. Si l'on fait passer de la vapeur à 100 degrés dans de l'eau à 0 degré, cette vapeur se condense, et le liquide s'échauffe promptement jusqu'à bouillir. Or il résulte des expériences que la vapeur à 100 degrés a absorbé cinq fois et demie ce qu'il faudrait de calorique pour élever l'eau à 100 degrés; donc si l'on fait passer 1 kilogramme de vapeur à 100 degrés dans $5^{kil},500$ d'eau à 0 degré, on obtiendra $6^{kil},500$ de liquide à 100 degrés; c'est un moyen assez simple d'échauffer l'eau d'un bain. Edouard Adam l'a appliqué à la distillation des vins qu'il a considérablement perfectionnée; son ingénieux appareil est employé avec succès dans plusieurs endroits du midi de la France.

DE L'HYGROMÉTRIE.

L'hygrométrie a un double but, celui de mesurer la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air, et celui de déterminer l'action que les divers corps de la nature peuvent exercer sur cette vapeur. Tous les instruments qui servent à mesurer la force élastique de la vapeur contenue dans l'air, se nomment des hygromètres; il y en a de deux sortes : les *hygromètres de condensation* dont la construction repose sur la condensation de la vapeur convenablement refroidie, et les *hygromètres d'absorption* qui reposent sur l'absorption de la vapeur au moyen de diverses substances.

Hygromètres de condensation. — Concevons un vase cylindrique en verre, plein d'eau, ayant ses parois parfaitement transparentes, nettes et bien essuyées; supposons qu'il soit placé sur un support dans un lieu dont la température est, par exemple, de 20 degrés, et qu'il ait lui-même cette température. Tout le monde sait que si l'eau contenue dans ce vase est graduellement refroidie à 19 degrés, puis à 18 et à 17, etc., il arrive un instant où la transparence est tout à coup troublée, et lorsqu'on regarde attentivement, on aperçoit que ce phénomène est dû à une rosée très-fine qui s'est déposée sur les parois. On appelle *point de rosée* l'instant précis où la rosée commence à se déposer; si le point de rosée a lieu, par exemple, au moment où l'eau du vase atteint la température de 15 degrés, on en conclura que la force élastique de la vapeur contenue dans l'air est de 13 millimètres, force élastique maximum pour la température de 15 degrés; s'il a lieu à 12 degrés, on en conclura que la vapeur a une force élastique de 11 millimètres, etc.; en un mot, la force élastique de la vapeur contenue dans l'air est toujours la force élastique maximum correspondante à la température du point de rosée. Tel est le principe simple et rigoureux sur lequel repose la construction des hygromètres de condensation. Tout se réduit à observer exactement la température du point de rosée et à chercher dans les Tables qui ont été dressées pour cet objet, la force élastique correspondante.

Hygromètres d'absorption. — Il y a un grand nombre de corps qui absorbent avec plus ou moins d'avidité la vapeur d'eau qui existe dans l'air, et comme en même temps ils éprouvent quelques changements dans leurs dimensions, dans leur poids ou dans quelques autres de leurs propriétés, on a essayé de prendre ces changements eux-mêmes pour la mesure des quantités de vapeur absorbées.

De tous les hygromètres qui sont construits d'après les changements de dimension que la vapeur produit dans différents corps, nous n'en décrirons qu'un seul, l'*hygromètre à cheveu*, que l'on appelle aussi l'*hygromètre de Saussure*.

Cet hygromètre dans sa forme la plus simple est représenté dans la *fig.* 44, *Pl. II.* Le cheveu est fixé par son extrémité supérieure à une pince P qui peut éprouver de légers déplacements au moyen de la vis V et du ressort R; il s'enroule par son extrémité inférieure sur une poulie à deux gorges, dont l'axe porte une aiguille G destinée à parcourir le cadran CC'.

Dans la seconde gorge de la poulie est enroulé un fil de soie portant

un petit contre-poids Q destiné à donner au cheveu une tension continuelle et toujours égale.

Quand l'air qui enveloppe le cheveu devient plus humide, le cheveu absorbe une nouvelle quantité d'humidité, il s'allonge, le contre-poids fait tourner la poulie, et l'aiguille marche vers le point H du cadran; au contraire, quand l'air devient plus sec, le cheveu perd une partie de son humidité; il se sèche lui-même, se raccourcit, entraîne le contre-poids, fait tourner la poulie, et l'aiguille marche vers le point S du cadran. Ces effets sont très-prompts; il est facile de voir, par exemple, que le souffle de l'haleine détermine un grand mouvement dans l'aiguille. Les indications que l'on peut tirer de l'hygromètre à cheveu reposent sur les deux principes suivants :

1°. Dans la sécheresse extrême, le cheveu prend toujours le même degré de raccourcissement, c'est-à-dire que l'aiguille finit toujours par s'arrêter au même point S du cadran, quelle que soit la température; ce point S est le point de la sécheresse extrême.

2°. Dans l'humidité extrême, le cheveu prend toujours le même degré d'allongement, c'est-à-dire que l'aiguille finit toujours par s'arrêter au même point H, quelle que soit la température; ce point H est le point de l'humidité extrême.

Pour le même cheveu, l'intervalle compris entre les points extrêmes S et H est toujours le même, et le mouvement de la pince supérieure P sert à changer un peu la longueur du cheveu, pour amener ces points sur le cadran, si naturellement ils n'y tombaient pas, ce qui pourrait bien arriver. Pour graduer l'instrument, on met l'hygromètre sous une cloche; on y fait le vide ou bien on y laisse l'air, mais dans l'un ou l'autre cas, on en absorbe toute l'humidité, soit avec l'acide sulfurique concentré, soit avec du chlorure de calcium bien calciné, et l'on observe le point où s'arrête l'aiguille : ce point est marqué 0 sur le cadran; c'est le point de sécheresse extrême, car l'expérience, répétée plusieurs fois à des températures différentes, donne très-sensiblement le même résultat. Il faut quelquefois plusieurs jours pour que l'aiguille cesse complétement de marcher au sec.

Ensuite on porte l'hygromètre sous une cloche dont on a mouillé les parois avec de l'eau distillée ; la cloche elle-même repose sur un plateau au fond duquel on a répandu quelques lignes d'eau, et l'on abandonne l'expérience à elle-même. L'aiguille marche rapidement vers le point H ou vers l'humidité, et enfin elle s'arrête; son point d'arrêt est le même, soit que la température ambiante soit 0°, 10°, 20° ou même 30°. C'est le point d'humidité extrême. On y marque 100; l'arc compris sur le cadran entre 0 et 100 est ensuite divisé en cent parties égales, et chacune de ces parties est ce que l'on nomme un degré d'humidité.

Mais d'après ce que nous venons de dire, l'hygromètre à cheveu ne nous donne encore que le moyen de comparer les divers degrés d'humidité; il nous permet de dire que l'air est à 60, à 80 ou à 100 degrés d'humidité; mais il ne nous dit rien sur la force élastique de la vapeur que cet air contient. Il faudrait déterminer quelle est la force élastique de la vapeur qui correspond à chacun des degrés de l'hygromètre à cheveu; d'après M. Gay-Lussac, quand l'hygromètre

à cheveu marque 100 degrés, la force élastique de la vapeur est au maximum, c'est-à-dire $9^{mm},5$. Pour 90 degrés, elle est à peu près les $\frac{4}{5}$ de son maximum ou $7^{mm},6$; pour 80 degrés, elle est à peu près les $\frac{2}{3}$ ou $6^{mm},4$.... ; pour 30 degrés, elle est à peu près $\frac{1}{7}$ ou $1^{mm},3$. Il est excessivement rare de voir l'hygromètre tomber à 30 degrés.

Malgré le travail important de M. Gay-Lussac sur ce sujet, l'hygromètre à cheveu ne peut donner que des approximations sur la force élastique de la vapeur contenue dans l'air, parce qu'il est par sa nature un instrument trop irrégulier dans sa marche, et soumis à trop d'incertitudes.

DES VENTS.

Ce qui a été dit jusqu'à ce jour sur les vents forme un sujet si vaste et si compliqué, qu'il est impossible de déduire une loi générale de l'ensemble des observations connues; nous devons donc nous borner à quelques remarques sur la direction des vents et sur les causes générales que l'on peut leur assigner.

Les vents peuvent se propager par *impulsion* ou par *aspiration*. Nous désignons ainsi deux modes opposés qui doivent être soigneusement distingués. Le vent se propage par impulsion quand le souffle a lieu dans un sens et la marche progressive dans le même sens : c'est ce qui arrive au vent qui sort d'un soufflet dans lequel l'air est comprimé; le vent se propage par *aspiration* quand le souffle a lieu dans un sens et la marche progressive en sens contraire : c'est ce qui arrive au vent qui entre dans un soufflet où l'air est raréfié; le souffle a lieu vers la buse où la marche progressive du courant a lieu en sens contraire; car les points les plus éloignés sont ceux qui reçoivent les derniers l'impression.

Ce dernier mode a été remarqué assez souvent dans le nord de l'Europe; quand le vent passe à l'ouest, dit Wargentin, il se fait sentir à Moscou plutôt qu'à Abo, quoique cette dernière ville soit de près de 400 lieues plus occidentale que Moscou, et il ne parvient en Suède qu'après avoir préalablement soufflé en Finlande.

Entre toutes les causes que l'on assigne au vent, l'une des plus puissantes est sans aucun doute la prompte condensation des vapeurs dans le sein de l'atmosphère. On voit quelquefois tomber 1 pouce d'eau en une heure sur une grande étendue de pays, particulièrement dans les régions équatoriales. Or supposons que cette étendue soit de 10 lieues de côté ou de 100 lieues carrées; si la vapeur qui est nécessaire pour produire 1 pouce sur 100 lieues carrées était dans l'air à l'état élastique et seulement à $0^{m},10$ de température, elle occuperait un espace cent mille fois plus grand qu'à l'état liquide, c'est-à-dire qu'elle occuperait un espace sur cent lieues carrées, de 100,000 pouces ou presque 10,000 pieds de hauteur. Telles seraient donc les dimensions du vide qui résulterait de cette condensation. A la vérité la vapeur n'est pas à l'état élastique; elle est à l'état vésiculaire; mais par cela seul qu'elle reste suspendue dans l'atmosphère, elle a probablement une densité moindre qu'à l'état liquide, et sa condensation en

gouttes de pluie produit un vide immense qui ne peut se remplir sans exciter une grande secousse atmosphérique.

BROUILLARDS ET NUAGES.

Lorsque la vapeur répandue dans l'atmosphère vient à subir une diminution de température, elle repasse à l'état liquide; mais l'air au milieu duquel ses particules sont logées devient un obstacle à la réunion en masse liquide, de sorte qu'il se forme une multitude de petits globules d'eau extrêmement fins, séparés les uns des autres par une petite couche d'air. Cet amas de petits globules constitue les brouillards et les nuages qui flottent dans notre atmosphère, qui descendent ensuite, et se déposent lentement à la surface de la terre où ils se résolvent en pluie. Saussure dit avoir observé que les petits globules d'eau sont creux : aussi a-t-il donné à leur assemblage le nom de vapeur vésiculaire; mais il paraît bien difficile de s'assurer de ce fait. Tout le monde sait que l'haleine des hommes et des animaux est visible pendant l'hiver; c'est que l'air étant plus froid que la vapeur expirée, lui enlève du calorique, et la sollicite à repasser à l'état liquide : il se forme alors un nombre plus ou moins grand de ces petits globules aqueux dont l'assemblage produit le brouillard observé.

Lorsqu'un corps froid se trouve au milieu d'une atmosphère chaude, il s'établit autour de lui un équilibre de température; mais alors la vapeur contenue dans l'air passe bientôt à l'état d'eau, et se dépose sur le corps. On a continuellement sous les yeux des exemples frappants de ces phénomènes : lorsqu'on transporte une bouteille de la cave dans un endroit chaud, on sait qu'elle se couvre bientôt d'une infinité de petits globules aqueux.

UDOMÈTRE.

La quantité de pluie qui tombe sur un même point de la terre est un élément météorologique dont la détermination est très-importante. L'instrument qui sert à cet usage s'appelle *udomètre*. La *fig*. 45, *Pl. II*, représente l'udomètre ordinaire : c'est un cylindre en cuivre de 6 à 8 pouces de diamètre; il se compose d'un récipient CC′ et d'un réservoir SS′. Le récipient porte un fond conique percé d'une ouverture O; il s'ajuste sur le réservoir SS′; au fond de celui-ci s'ouvre un tube coudé TT qui se relève le long de la paroi extérieure; là il reçoit un tube en verre VV′ qui est divisé en parties égales, et qui sert à indiquer la hauteur du liquide intérieur. On mesure exactement la surface du récipient CC′, on jauge le réservoir SS′ pour connaître la quantité de liquide qui correspond aux diverses divisions du tube VV′, et il est facile d'en déduire la quantité de pluie, c'est-à-dire l'épaisseur de couche qu'elle aurait formée dans un vase à fond plat et horizontal.

Avec cet appareil on a reconnu que la quantité moyenne de pluie qui tombe à Paris, dans la cour de l'Observatoire est de 56 centimètres, tandis que celle qui tombe sur la terrasse est seulement de 50 centimètres : d'où il résulte ce fait remarquable, qu'à Paris la quantité de pluie qui tombe à 28 mètres de hauteur n'est que les $\frac{8}{9}$ à peu

près de celle qui tombe sur le sol. On présume que ce phénomène dépend de la condensation que les gouttes de pluie froides déterminent dans la vapeur, en traversant les couches inférieures de l'atmosphère, et peut-être aussi des brouillards, qui sont toujours plus denses à la surface du sol et qui déposent une quantité notable d'eau.

ÉLECTRICITÉ.

Moyens de produire la vertu électrique. — Électricité par frottement. — Les principaux moyens de produire la vertu électrique sont : le frottement, la compression, le contact et la chaleur. En frottant une baguette de verre avec un morceau de drap, ou mieux encore avec un tampon de papier gris, on produit le dégagement d'une faible lumière qu'on aperçoit dans l'obscurité; si l'on présente ensuite la baguette à la main, on en tire de petites étincelles, et si on la présente à des corps légers, on les voit aussitôt se précipiter sur elle. Un bâton de cire d'Espagne frotté de la même manière produit à peu près les mêmes effets; mais il est plus difficile d'en tirer des étincelles. Une personne montée sur un gâteau de résine et qu'on frappe par un temps sec avec une peau de lièvre par exemple, donne des marques très-sensibles d'électricité, et l'on peut tirer des étincelles des différentes parties de son corps.

Machine électrique.

Dans la machine électrique ordinaire, le développement de l'électricité est produit par le frottement d'un plateau de verre entre quatre coussins de soie remplis de crins. Le plateau est traversé par un axe qui porte une manivelle; il est soutenu dans une position verticale entre deux montants de bois. Au devant du plateau se trouve un cylindre métallique de cuivre ou de fer-blanc qu'on nomme *conducteur* et qui est soutenu par des colonnes de verre. Ce conducteur est terminé vers la glace par deux branches dont chacune est pourvue à son extrémité d'un godet garni de pointes. Les coussins doivent être frottés à la partie qui touche le verre avec de l'oxyde sulfuré d'étain ou avec un alliage d'une partie de zinc et de cinq parties de mercure. La partie postérieure du coussin communique avec une tige métallique qui descend le long des montants de bois et communique avec la terre. A l'effet de donner à la machine plus d'action, on peut envelopper en partie le plateau avec un taffetas verni (*fig.* 46, *Pl. II*).

La machine que nous venons de décrire produit sur ses conducteurs de l'électricité vitrée; si l'on voulait de l'électricité résineuse, il faudrait faire communiquer le plateau avec le sol, et les coussins avec les conducteurs. Pour produire plus d'effet, il faut faire communiquer les coussins avec le sol par le moyen d'une chaîne métallique, sans quoi les effets seraient faibles.

On peut, si l'on veut, remplacer le plateau de verre par un plateau ou une boule de résine, et construire ainsi soi-même une machine électrique peu coûteuse, suffisante pour étudier tous les phénomènes de l'électricité. Tout le temps que la machine électrique est en mouvement, on sent une odeur particulière, assez semblable à celle du gaz hydrogène. Si l'on approche la main ou le visage du plateau ou

du conducteur, on sent un frémissement particulier. Enfin, si l'on présente le doigt au conducteur, on en tire une étincelle lumineuse qui fait éprouver une faible piqûre. Si l'on fait l'expérience dans l'obscurité, on voit des traînées de lumière qui serpentent sur la glace et des étincelles que soutirent continuellement les pointes du conducteur tournées vers le plateau.

Électricité par contact. — Deux plaques, l'une de zinc, l'autre de cuivre, par exemple, étant mises en contact, acquièrent chacune la vertu électrique; mais, pour apprécier les petites quantités d'électricité produite, il faut des instruments particuliers que nous décrirons. La colonne de Volta ou pile galvanique est composée de couples de zinc et de cuivre séparés les uns des autres par un corps liquide. Les phénomènes électriques produits par cet appareil sont, à de légères différences près dans la manière, les mêmes que ceux de l'électricité par frottement.

Électricité par compression. — M. Haüy a fait voir qu'il suffisait de passer une plaque de carbonate de chaux pendant un instant entre ses doigts pour lui faire acquérir une électricité très-marquée; elle conserve cet état électrique très-longtemps, plusieurs semaines même, et elle ne le perd pas quoiqu'on la mette en contact avec des corps conducteurs. Plusieurs autres substances présentaient cette propriété dans un degré moindre, et d'autres n'en présentaient aucune trace. Depuis, M. Bequerel a fait voir que tous les corps étaient susceptibles d'acquérir l'électricité par pression, et que si quelques-uns avaient paru privés de cette propriété, cela tenait uniquement à ce qu'ils n'avaient pas, comme le carbonate de chaux et quelques autres, la faculté de retenir en eux-mêmes par une influence propre, l'électricité que la compression développait; il suffit, pour reconnaître cette propriété dans ces corps, de les isoler pendant et après la compression qu'on leur fait subir : ces substances ainsi isolées, étant pressées les unes contre les autres, se trouvaient constituées à des états électriques différents. Plus les substances sont facilement compressibles, plus elles favorisent le développement de ces phénomènes.

Électricité par la chaleur. — Il existe plusieurs substances minérales qui, après avoir été chauffées, donnent des signes évidents d'électricité par les attractions ou les répulsions qu'elles exercent sur d'autres corps : telles sont, par exemple, la topaze, la tourmaline, etc.

Électricité animale. — Il existe plusieurs poissons qui ont la propriété de développer à leur gré une plus ou moins grande quantité d'électricité, dont ils se servent pour se défendre contre les attaques de leurs ennemis, ou pour étourdir les animaux dont ils font leur proie. Diverses opérations chimiques, comme la dissolution des métaux dans les acides, divers genres de décomposition, la combustion, le passage des corps solides à l'état liquide, des liquides à l'état de vapeur, etc., provoquent aussi le dégagement d'une certaine quantité d'électricité.

Hypothèse des fluides électriques. — On ignore quelle est la cause première de l'électricité, et pour lier entre eux les différents phénomènes constatés par l'expérience, il faut nécessairement adopter une hypothèse qui puisse rendre raison de chacun d'eux. Mais il faut se garder

de prendre cette hypothèse comme une réalité; il n'y faut voir qu'un moyen commode de prévoir les différents phénomènes et de les lier entre eux.

Hypothèse de Symmer. — Dans cette hypothèse, tous les corps de la nature renferment un fluide particulier qu'on nomme *fluide naturel*; le globe terrestre peut être regardé comme un immense réservoir: aussi lui donne-t-on, quand il s'agit d'électricité, le nom de *réservoir commun*. Le fluide naturel n'a par lui-même aucune propriété électrique: il est le résultat d'une combinaison neutre de deux autres fluides, dans lesquels cette propriété réside. Ces fluides, qu'on peut isoler de diverses manières et qui produisent alors des phénomènes qui dépendent de leur nature, ont une grande tendance à se réunir, à se neutraliser mutuellement, et, pour cela même, ils donnent encore lieu à d'autres effets. Il n'est point d'expression qui définisse mieux ces fluides que celle de fluide *positif* et de fluide *négatif*, par laquelle on les compare à des quantités mathématiquement de même genre, affectées de signes contraires qui se détruisent en tout ou en partie par leur addition, suivant leur rapport de grandeur, et dont la plus grande produit un reste affecté de son signe. Cependant nous avons remplacé ces expressions par les noms de fluide *vitré* et de fluide *résineux*, parce que l'un est donné ordinairement par le frottement du verre, l'autre par celui de la résine. Il arrive cependant très-souvent qu'on obtient du fluide vitré en frottant la résine, et au contraire du fluide résineux en frottant le verre, comme nous le verrons bientôt.

Phénomènes généraux. — Si l'on porte près de la joue un bâton de verre frotté avec une étoffe de laine, on éprouve une sensation pareille à ce que produirait une toile d'araignée; si l'on en approche le doigt ou une boule de métal, on entend le pétillement d'une étincelle lumineuse dans l'obscurité; le tube est couvert lui-même d'une lumière bleuâtre. On remarque encore que les corps ainsi frottés répandent une odeur de phosphore.

Tous les corps simples ou composés, liquides ou gazeux, sont susceptibles d'acquérir les propriétés électriques par le frottement. Par exemple, si l'on agite du mercure dans un vase de verre, on trouvera le verre électrisé; on fait encore les mêmes expériences en plaçant du mercure dans une capsule de bois fixée à l'extrémité d'un tube de verre, en faisant ensuite le vide dans le tube. Bientôt le mercure, pressé par le poids de l'atmosphère, tombera sous forme de pluie dans l'intérieur du tube; alors en approchant des corps légers du tube, on voit qu'il est électrisé. On tire de là l'explication d'un phénomène que présente le baromètre bien purgé d'air. Quand on penche un baromètre, de manière que le mercure remplisse rapidement tout le tube, on voit, si l'expérience est faite dans l'obscurité, se développer une lumière phosphorique tout à fait semblable à celle que produit l'électricité dans le vide.

Un corps solide peut aussi par le frottement d'un gaz s'électriser d'une manière sensible; ainsi, qu'on dirige, au moyen d'un soufflet, un courant d'air contre un carreau de verre, on le mettra dans l'état électrique. Il serait difficile de prouver directement que, dans le frottement mutuel de deux gaz, il y a de l'électricité dégagée; mais on le

conçoit par analogie, et même n'est-il pas probable qu'une partie de l'électricité répandue dans l'atmosphère provient du frottement de l'air contre lui-même et contre les nuages?

Propagation de l'action électrique. — L'action électrique se propage à distance à travers toutes les substances; ainsi une petite boule de sureau suspendue à un fil de soie, sous une cloche de verre, sera attirée par un bâton de cire d'Espagne placé hors de la cloche, et qu'on aura préalablement électrisé.

L'électricité se propage à travers les corps; mais les corps, considérés sous le rapport de la propriété de conduire l'électricité, diffèrent entre eux: les uns, comme les métaux, l'eau et en général tous les liquides, l'huile exceptée, sont bons conducteurs; la résine, la gomme, la cire d'Espagne, la soie, le soufre, les pierres, le verre, les oxydes, l'air et les autres gaz sont de mauvais conducteurs. La plupart des bois parfaitement secs, la fibre animale desséchée conduisent assez mal les fluides électriques; mais à l'état frais, ces matières les conduisent très-bien, ce qu'on peut attribuer aux corps liquides dont elles sont pénétrées. Les corps aériformes bien secs sont de mauvais conducteurs et d'autant plus qu'ils sont plus denses. L'air atmosphérique est généralement mauvais conducteur; mais lorsqu'il est chargé de petites particules d'eau éparses entre ses molécules, sa faculté conductrice augmente. Le degré de température influe aussi sur la faculté conductrice des corps; la chaleur l'augmente.

Les fluides électriques se répandent avec la plus grande facilité dans le vide, sous la forme de lumière blanche, ou plus souvent purpurine, ce qui paraît dépendre de la quantité de fluide qui peut s'échapper à la fois. Pour constater la différence entre les corps conducteurs et les corps non conducteurs, prenez deux petites boules de moelle de sureau parfaitement semblables, suspendez l'une à un support de verre par un fil de verre ou de soie, suspendez l'autre à un support de métal par le moyen d'un fil métallique, donnez à ces deux boules de l'électricité en les touchant par un bâton de verre électrisé; vous remarquerez que la boule suspendue à un fil métallique a perdu instantanément son électricité, tandis que celle qui est suspendue à un fil de soie a conservé la sienne : or il n'y a de différence que dans la manière dont elles communiquent avec la terre. L'une des boules communique avec la terre par un métal; son fluide électrique trouve à travers le métal un passage facile et se dissipe en totalité; l'autre, séparée du sol par une substance peu conductrice, n'éprouve aucune perte. Remplacez le fil de soie par un fil de résine, de soufre, etc., vous obtiendrez le même résultat : toutes ces substances sont donc impropres à transmettre l'électricité. Mouillez le fil avec de l'eau, à l'instant toute l'électricité disparaîtra, parce que l'eau est un bon conducteur.

Un corps est isolé quand il a pour support un corps non conducteur, un fil de soie, un bâton de cire d'Espagne, un tube de verre, etc. Coulomb a remarqué que le meilleur isoloir était une aiguille fine de résine-laque.

On doit concevoir, d'après ces considérations, pourquoi il est nécessaire dans les machines électriques que les conducteurs soient sup-

portés par des colonnes de verre. Lorsqu'on établit une communication entre le conducteur et la terre, la machine électrique ne produit aucun effet, parce que le fluide électrique se répand aussitôt dans le réservoir commun, qui est un corps trop volumineux pour en être affecté.

La vitesse avec laquelle les fluides électriques se propagent d'un point à un autre dans un corps conducteur est excessivement grande; on peut conjecturer qu'elle est aussi grande que celle de la lumière, car dans diverses expériences on n'a pu apercevoir aucune différence entre le moment où l'électricité est communiquée sur un point et celui où elle se manifeste à 6 ou 8 millimètres de distance.

Tabouret électrique.

On appelle *tabouret électrique* une petite table dont les pieds sont en verre; il est beaucoup de circonstances où l'on doit isoler les corps qu'on soumet à des expériences. Par exemple, veut-on savoir si les métaux deviennent électriques par le frottement, il faut les isoler par un manche de verre; si on les frotte ainsi isolés avec une peau de chat ou une étoffe de laine, on verra que les métaux s'électrisent comme les corps non conducteurs, tandis que si on les tenait à la main en même temps qu'on les frotte, l'électricité se dissiperait dans le sol.

L'air est, comme nous l'avons dit, un très-mauvais conducteur; il maintient par sa pression l'électricité à la surface des corps. Ce qui le prouve, c'est que si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique un conducteur électrisé et isolé sur des supports de verre ou de résine, ce corps peut, même avant que le vide soit complétement fait, perdre toute l'électricité dont il est chargé. Si l'on fait la même expérience avec un corps non conducteur, par exemple avec une boule de cire d'Espagne électrisée par le frottement, l'électricité se dissipera aussi dans le vide, mais avec plus de lenteur, et il faut un certain intervalle de temps sensible pour que le corps en soit tout à fait dépouillé. Ce dernier résultat montre qu'à la surface des corps non conducteurs, l'électricité est retenue par la pression de l'air, jointe à la difficulté qu'elle éprouve à se dégager de leurs particules. Nous avons parlé de la nécessité d'isoler les corps conducteurs, quand on les charge d'électricité; en effet, sans cette précaution ils perdraient toute leur électricité qui se dissipe dans le sol, où elle devient inappréciable. Pour que le développement de l'électricité par le frottement soit facile, il faut préalablement sécher les corps qu'on veut soumettre aux expériences; on y parvient en les échauffant légèrement. Il est aussi indispensable d'échauffer le lieu où se font les expériences, afin que l'air devenant ainsi capable de prendre de nouvelles vapeurs, n'en laisse pas déposer sur le corps qu'il enveloppe.

Électricité opposée. — Si, après avoir attaché deux petites boules de sureau par deux fils métalliques à un bâton de résine, on frotte cette substance bien sèche avec une étoffe de laine également sèche, on verra les deux boules se repousser à une certaine distance. En faisant l'expérience avec un bâton de résine et une seule boule, et approchant cette dernière boule des deux premières, il y aura répul-

sion. Si l'on répète ces deux expériences, en remplaçant le bâton de résine par un bâton de verre, on verra que les boules de moelle de sureau se repousseront de même. Maintenant, si l'on approche les boules électrisées par le verre de celles qui le sont par la résine, il y aura attraction; en poursuivant les mêmes essais, on reconnaîtra 1° *que deux corps chargés de la même espèce d'électricité se repoussent;* 2° *que deux corps chargés d'électricité différente s'attirent.*

De plus, il résulte des expériences que, parmi tous les corps, les uns donnent la même électricité que le verre, ce sont les oxydes, les pierres, etc. : on l'a appelée *électricité vitrée;* les autres donnent la même électricité que la résine, ce sont l'ambre, la soie, etc. : elle a reçu le nom d'*électricité résineuse.* L'étoffe de laine, la peau du chat, et toutes les matières dont on se sert pour frotter un corps solide, se chargent d'électricité résineuse, si ce corps acquiert l'électricité vitrée, ou réciproquement. Pour le prouver, on n'a qu'à présenter le morceau d'étoffe qui a servi à électriser la résine : elle attirera la petite boule de sureau chargée d'électricité résineuse, et repoussera la boule chargée d'électricité vitrée.

En recherchant la nature de l'électricité développée par le frottement d'un grand nombre de substances, on reconnaît que la nature de cette électricité n'a rien d'absolu, et qu'elle dépend autant du corps frottant que du corps frotté; par exemple, la cire frottée avec le verre poli, acquiert l'électricité vitrée; frottée avec la résine, elle acquiert l'électricité résineuse. Un bâton de verre poli, frotté avec une étoffe de laine, l'électrise vitreusement, et frotté avec une peau de chat, l'électrise résineusement. On a fait beaucoup d'essais pour trouver les circonstances qui déterminent chacun des corps à prendre l'espèce particulière d'électricité qu'ils acquièrent, mais les essais n'ont rien appris de bien potitif.

L'électricité se développe dans une infinité de circonstances. Dans la fusion : si l'on verse du soufre fondu dans un vase métallique isolé, le soufre prend en se refroidissant l'électricité vitrée, et le métal l'électricité résineuse. Dans l'union chimique des corps : si l'on dissout de la limaille de fer dans l'acide sulfurique, il se développe une quantité considérable d'électricité, comme l'ont reconnu Lavoisier et Laplace. La même chose serait observée dans la dissolution des autres métaux dans les acides. Il est bien constant que la combinaison des alcalis et des acides est une source abondante d'électricité : l'alcali prend une électricité, l'acide acquiert l'électricité opposée.

Électromètre. — Électroscope.

C'est d'après les phénomènes d'attraction et de répulsion qu'ont été construits les électroscopes et les électromètres, instruments qui servent à déterminer l'espèce d'électricité dont un corps est animé, et la quantité approximative du fluide électrique qu'il renferme.

Pour connaître si un corps est électrisé, il suffit de le présenter à un corps mobile à l'état naturel, et de voir s'il l'attire. Pour déterminer l'espèce d'électricité acquise par un corps, il suffit d'examiner s'il attire ou s'il repousse un corps mobile auquel on aura préalablement communiqué une espèce d'électricité connue.

L'électroscope de M. Haüy, qui est très-commode dans plusieurs expériences, consiste en une aiguille métallique terminée par deux petites boules, et mobile sur un pivot (*fig.* 47, *Pl. II*). On isole cet appareil sur une lame de verre ou sur un petit gâteau de résine; on l'électrise vitreusement en le touchant avec une baguette de verre électrisée, ou résineusement en le touchant avec un bâton de cire d'Espagne.

L'électromètre (*fig.* 48, *Pl. II*) consiste en une bouteille carrée, dans le goulot de laquelle passe une tige métallique qui en dehors se termine en boule et au dedans communique avec deux lames d'or coupées dans des feuilles d'or battu, suspendues parallèlement et très-mobiles. En présentant un corps électrisé à la boule *a*, les lames d'or s'écartent l'une de l'autre, et leur écart s'estime par la division *c' d* tracée sur une des faces de la bouteille.

Développement de l'électricité par influence.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que le frottement dans la production de l'électricité, mais il existe un mode particulier de la développer dans un corps au moyen d'un autre corps préalablement électrisé. Lorsqu'on prend un corps électrisé et qu'on le présente à un corps qui ne l'est pas, sans qu'il y ait contact entre eux, ni déperdition de fluide dans le premier, le second corps se constitue à l'instant dans un état électrique, et ce phénomène est ce qu'on appelle le *développement de l'électricité par influence*.

Pour faire cette expérience, on prend un cylindre horizontal en cuivre, terminé par deux boules munies d'électromètres et isolées par un bâton de résine; on approche de l'une des boules un corps qu'on a électrisé vitreusement avec la machine, et à l'instant les deux électromètres donnent des signes d'électricité qui se développe ainsi : cette électricité n'est pas unique, elle est à la fois de deux espèces, résineuse à l'une des extrémités et vitrée à l'autre, et toujours la boule située du côté du corps électrisé prend une électricité contraire à celle de ce dernier; c'est ce qu'on prouve en enlevant successivement avec une tige de métal des portions de ces deux électricités, et les communiquant à un électromètre. Ce développement d'électricité n'est pas un partage de fluide contenu dans le corps que l'on présente, car aussitôt qu'on vient à soustraire celui-ci, il n'y a plus aucun signe électrique, ce qui prouve que c'est un phénomène passager qui exige la puissance d'autres corps pour se manifester. Le cylindre renferme donc en lui tout ce qu'il faut pour le phénomène, c'est-à-dire les deux électricités développées, et elles sont telles, qu'elles se balancent entre elles comme les deux électricités produites par le frottement de deux plateaux, l'un de verre et l'autre de métal, se balançant quand on les met en contact. Pour expliquer ce phénomène, on est conduit à se former une idée plus précise de l'électricité. On suppose que les deux électricités ne sont autre chose que deux fluides. Quand on présente un corps électrisé à un corps léger et qui ne l'est pas, celui-ci se trouve attiré; mais on voit qu'il ne l'est que parce qu'il a été préalablement électrisé par l'influence et, par conséquent, rendu attirable. L'électricité par influence se développe avec beaucoup de rapidité dans les métaux, mais très-lentement dans les corps non conducteurs;

c'est ce qu'il est facile de prouver. Si l'on présente parallèlement un bâton de cire et deux petites boules suspendues, l'une en métal et l'autre en cire, la première sera attirée aussitôt, tandis que la seconde ne le sera pas, ou ne le sera que plus tard et plus difficilement.

Tout ce que nous venons de dire se rapporte aux propriétés générales des fluides électriques considérés à l'état libre. Nous allons maintenant considérer la manière dont ils se comportent dans les corps.

D'abord nous ferons une observation importante : c'est que les qualités des fluides électriques qui se développent dans les corps sont indépendantes de leur nature particulière et de leur masse; elles restent les mêmes, que les corps soient creux ou pleins, de bois ou de métal : ce qui prouve que les corps ne sont pour rien dans le développement de l'électricité. Leur nature particulière ne peut influer que sur le temps des développements. Ainsi, que l'on prenne des boules de même dimension, l'une de métal et l'autre de bois, et qu'on les touche l'une et l'autre avec un corps conducteur, elles seront également électrisées; d'où il suit que l'électricité ne peut être dans l'intérieur des corps; elle n'a aucune affinité pour eux; ses molécules sont douées d'une force répulsive en vertu de laquelle elles tendent à se fuir et à se répandre dans l'espace. Tout le fluide que l'on communique à un corps se porte en totalité vers sa surface, où il forme une couche très-mince terminée en dehors par la surface même du corps et retenue par la pression de l'air; c'est, en effet, ce que confirme l'expérience. Ainsi, si l'on électrise une sphère creuse et qu'on la touche ensuite avec une boule de métal, isolée, cette boule s'électrisera par le contact à l'extérieur, tandis qu'à l'intérieur il ne se produira rien. Les molécules qui composent la couche de fluide exercent à leur tour une pression; lorsque cette dernière pression est devenue supérieure à la première, le fluide électrique s'échappe dans l'air en un torrent invisible ou sous la forme d'un bruit lumineux qu'on nomme *étincelle électrique*.

D'après ce qui précède, on voit que pour compléter l'explication des phénomènes que présentent les corps électrisés, il est nécessaire d'y faire intervenir l'action de l'air considéré comme un corps isolant et élastique. Lorsqu'un corps chargé d'une espèce quelconque d'électricité, par exemple d'électricité résineuse, est en présence d'un autre corps à l'état naturel, le fluide en activité dans le premier décompose le fluide naturel du second, attire vers lui le fluide vitré qui s'est dégagé de ce fluide naturel, et repousse en sens contraire le fluide résineux. Ces deux fluides restent à la surface du corps où ils sont maintenus par la pression de l'air environnant, le premier formant une petite couche au-dessous de la partie de cette surface qui est tournée vers le corps électrisé, et le second formant de même une petite couche au-dessous de la partie opposée. Si le corps est mobile et léger, il se précipite sur le corps électrisé; mais il faut distinguer deux cas : celui où le corps mobile est conducteur, et celui où il ne l'est pas. Dans le premier cas, les deux fluides dégagés conservent leur tendance, l'un pour se porter vers le corps électrisé, et l'autre pour s'en éloigner, réagissant contre la pression de l'air environnant; mais parce que le corps attire plus fortement le fluide vitré sur lequel

il agit de plus près, qu'il ne repousse le fluide résineux, la réaction du premier l'emporte sur celle du second, et, par une suite nécessaire, la pression de l'air sur le fluide résineux devient prépondérante, en sorte qu'elle presse le corps mobile vers le corps électrisé. Si le dernier est conducteur, les deux corps, après le contact, se repoussent, parce que les deux fluides d'espèce différente se réunissent et reforment des fluides naturels, et qu'ensuite les deux corps se trouvent électrisés de la même manière. Dans le cas où le corps mobile est isolant, l'action de l'air n'intervient pas seule dans le phénomène; mais le corps opposant lui-même de la résistance au mouvement du fluide, celui-ci réagit sur lui, et l'entraîne de plus après le contact; ils restent appliqués l'un sur l'autre, parce que les deux fluides électriques, ne se mouvant qu'avec peine, ne peuvent se combiner ensemble pour reformer du fluide naturel : ils continuent donc de s'attirer mutuellement.

Distribution de l'électricité à la surface des corps. — Des pointes.

Nous avons vu que l'électricité tendait toujours à se répandre à la surface des corps, et qu'elle s'éloignerait infiniment du centre, si elle n'était retenue contre cette surface par la pression de l'air qui, n'étant pas conducteur, ne permet pas un libre passage au fluide. La couche formée par la matière électrique au-dessous de la surface, ne renferme pas le même nombre de molécules, ou n'a pas ce même degré de densité en chaque point de cette surface, excepté dans le cas de la sphère. Il importe donc de savoir comment elle se dispose en général sur les différents corps. Pour mesurer la densité ou l'épaisseur de la couche électrique en divers points d'un même corps, on se sert d'un petit disque métallique isolé que l'on électrise en le mettant en contact avec un de ses points, et dont on mesure ensuite l'intensité électrique avec l'électromètre ou un instrument plus parfait connu sous le nom de *balance de Coulomb*. Mais, pour que l'appréciation soit exacte, il faut que le petit disque enlève toujours une quantité de fluide proportionnelle à la densité de la couche au point que l'on considère; c'est ce dont on peut s'assurer par l'expérience suivante : que l'on prenne une boule de métal et qu'on la charge d'électricité, qu'on la touche avec le petit disque, et l'on mesurera la quantité de fluide qu'il aura dérobé; puis, rétablissant la boule dans son premier état, on la mettra en contact avec une autre boule semblable. Il est clair qu'il se fera un partage égal d'électricité entre les deux boules, en sorte qu'après leur séparation, la première n'aura plus que la moitié de l'électricité qu'elle contenait d'abord, et, par conséquent, l'épaisseur ou la densité de la couche sera diminuée de moitié; or, si l'on répète l'épreuve avec le petit disque, on voit que le résultat marqué par la balance aura précisément baissé dans le même rapport : on pourra donc aussi par ce moyen constater la nature de la couche électrique en chacun de ses points pour un corps de forme quelconque. On conçoit aisément que dans le cas d'une sphère, la couche électrique doit être d'une épaisseur uniforme, mais il n'en est plus de même dans un autre corps. Sur un corps produit par le mouvement d'une ellipse tournant sur son grand axe, l'intensité électrique est

plus grande sur l'extrémité de cet axe que sur l'équateur; l'épaisseur de la couche varie donc de manière qu'elle est terminée extérieurement par la surface même de l'ellipsoïde, et intérieurement par une surface semblable. En allongeant le grand axe sans changer le petit, on peut obtenir aux pôles une épaisseur ou une densité électrique aussi considérable que l'on voudra, et, comme la pression de l'air qui retient le fluide à la surface des corps est constante, on conçoit qu'il y aura un terme où l'électricité venant à la vaincre se répandra dans l'atmosphère. Ceci nous conduit à concevoir ce qu'on appelle le *pouvoir des pointes;* car on peut assimiler une pointe ou un cône à un ellipsoïde fort allongé, et à l'extrémité d'une pointe d'aiguille, par exemple, la densité électrique serait infinie. Il suit de là qu'une pareille pointe ne conservera pas l'électricité qu'on aura communiquée au corps dont elle fait partie, et, par là même, elle sera très-propre, comme nous le verrons, à soutirer l'électricité des corps environnants. En général, sur un corps de forme quelconque, la densité de la matière électrique et, par conséquent, la pression sur l'air sont plus grandes sur les parties aiguës que sur celles qui sont aplaties.

Électricité accumulée.

Lorsqu'un corps conducteur isolé s'électrise par communication, il acquiert une charge électrique déterminée. La condition qui limite la quantité de fluide qu'il peut recevoir est que la force expansive de ce fluide ne peut pas dépasser la pression de l'air qui le retient à la surface. Supposons que ce conducteur soit une lame métallique dont une surface soit recouverte d'air, et l'autre d'un corps solide isolant, tel qu'une lame de verre. Si l'on approche du côté de cette dernière lame un troisième corps conducteur communiquant librement avec le sol, la présence de ce nouveau corps déterminera le premier conducteur à se charger beaucoup plus fortement; en effet, l'électricité que reçoit le premier conducteur agit par distance sur le second et l'électrise par influence. L'électricité contraire qui se fixe sur le second conducteur réagit sur celle du premier, et l'attirant à elle, tend par conséquent à la retenir contre le verre et à diminuer la force expansive. Il faudra donc dans le premier conducteur une plus grande quantité de fluide, parce que la nouvelle charge contre-balance la pression de l'air environnant. On voit donc que le moyen d'accumuler l'électricité dans un conducteur, est d'en combiner deux ensemble en les séparant par une lame de matière isolante, telle qu'une lame de verre : cette combinaison est réalisée dans l'instrument connu sous le nom de *bouteille de Leyde.*

Bouteille de Leyde.

Cet appareil se compose d'une bouteille de verre dont la surface extérieure est garnie d'une feuille d'étain jusqu'à une certaine hauteur. L'intérieur est rempli jusqu'à la même hauteur de feuilles minces de cuivre. Cette matière intérieure tient lieu d'une garniture ou armure semblable à celle dont la surface extérieure est recouverte. La bouteille a un bouchon de liége traversé par une tige de métal dont la partie inférieure communique avec les corps qui garnissent

la capacité de la bouteille, et dont la partie supérieure se recourbe et se termine par une boule métallique (*fig.* 49, *Pl. III*). Cette bouteille se charge lorsqu'on met le bouton métallique en contact avec le conducteur d'une machine dont le plateau est en mouvement. Il est nécessaire que la face extérieure ne soit point isolée, pour que son fluide naturel puisse être librement décomposé, ce qui exige qu'une de ses électricités soit refoulée dans le sol. Si le conducteur de la machine est chargé d'électricité vitrée, l'intérieur de la bouteille se trouve électrisé vitreusement, et l'intérieur résineusement.

En tenant la bouteille par le bouton et mettant l'armure extérieure en communication avec la machine, on aura une disposition contraire des deux électricités. Pour décharger la bouteille, il suffit d'établir une communication entre les deux garnitures, ce que l'on peut faire à l'aide d'un excitateur ou arc métallique terminé par deux petites boules dont on met l'une en contact avec la garniture extérieure, tandis qu'on approche l'autre de la tige qui traverse le bouchon; on produit ainsi la décharge qui est accompagnée d'une forte étincelle : on peut aussi la produire, en touchant avec les deux mains les deux garnitures de la bouteille; on ressent alors dans les membres, surtout aux articulations, une commotion plus ou moins violente. Plusieurs centaines de personnes qui se tiennent par la main reçoivent en même temps la secousse, lorsque la première personne de la chaîne tenant la bouteille par la garniture extérieure, fait toucher le bouton à la personne placée à l'autre extrémité. Ce fait peut prouver que la vitesse de la matière électrique en mouvement est immense. Elle surpasse de beaucoup celle d'un boulet au sortir du canon, qui est d'environ 600 mètres par seconde.

Batterie électrique.

Une batterie électrique est une réunion de bouteilles de Leyde dont les garnitures extérieures communiquent entre elles au moyen d'une lame d'étain sur laquelle les bouteilles de Leyde sont placées; les garnitures intérieures communiquent aussi entre elles par le moyen de tiges métalliques adaptées au bouton. On charge cet appareil de la même manière qu'une simple bouteille de Leyde, en faisant communiquer une des garnitures avec le conducteur d'une machine électrique, et l'autre avec le réservoir commun. La décharge de la batterie électrique s'effectue aussi comme celle d'une simple bouteille, en établissant une communication entre la garniture intérieure et la garniture extérieure; en se servant de l'excitateur, on obtient une étincelle extrêmement vive qui peut traverser une plaque de verre sans la briser, en y faisant seulement un trou imperceptible, ce qui tient à la vitesse immense avec laquelle elle est lancée. La force d'une batterie est proportionnelle au nombre de bouteilles dont elle est composée. Ses effets sont très-violents, et l'on doit éviter d'en recevoir la décharge, car elle pourrait donner lieu à des accidents funestes; les oiseaux et autres petits animaux placés de manière à recevoir la commotion sont frappés de mort. Il suffit pour cela d'une batterie de quelques bouteilles. L'étincelle d'une batterie brise les cylindres de bois qu'on lui fait traverser; elle rougit, brûle des fils

déliés de métal; projetée sur une substance combustible, telle que l'esprit-de-vin, elle l'enflamme aisément, elle détermine facilement la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène, lorsque ces deux gaz sont mêlés dans la proportion nécessaire pour former l'eau.

Électrophores.

L'électrophore est un appareil qui a la faculté de conserver longtemps l'électricité dont il est chargé; il se compose d'un gâteau de résine sur lequel on place un disque métallique attaché par le milieu à un manche de verre. Le disque étant d'abord séparé de la résine, on électrise celle-ci en la frottant avec une peau de chat; ensuite on applique le disque métallique sur la résine, et l'on pose le doigt pendant un instant sur le même disque; on retire d'abord le doigt, puis on enlève le disque à l'aide de son manche de verre; il se trouve alors chargé d'électricité vitrée, et l'on peut en tirer une étincelle en lui présentant le doigt ou un excitateur. Si on le replace sur le gâteau de résine, et que l'on répète le même procédé, on en tirera une nouvelle étincelle, et l'on pourra continuer ainsi presque aussi longtemps qu'on voudra; c'est pourquoi les appareils de ce genre ont reçu le nom d'*électrophores*, c'est-à-dire porteurs d'électricité.

L'électricité dont ce gâteau de résine est animé, décompose le fluide naturel du disque métallique, attire fortement à elle le fluide vitré, et repousse le fluide résineux dans le sol à travers le doigt de l'opérateur : la résine étant un mauvais conducteur, retient son électricité et l'empêche de se combiner avec le fluide vitré du disque métallique; aussi les deux électricités en présence se conservent-elles très-longtemps, lorsque le disque métallique reste en contact avec le plateau résineux. Lorsqu'on vient à les séparer, le fluide vitré dégagé de la combinaison se répand librement dans le disque et manifeste alors sa présence.

Condensateur.

Le condensateur est un instrument au moyen duquel on rend sensibles de très-petites quantités d'électricité qu'un même corps développe successivement en le déterminant à l'accumuler sur sa surface; il ne diffère de l'électrophore qu'en ce que le gâteau de résine s'y trouve remplacé par un plateau formé d'un corps qui n'isole qu'imparfaitement, tel qu'un plateau de marbre ou une plaque de métal couverte d'une couche de vernis résineux. Ayant placé sur ce dernier plateau le disque métallique, nommé *plateau collecteur*, on communique à celui-ci même une certaine quantité de fluide électrique qui décompose le fluide naturel du plateau inférieur. L'électricité développée dans ce plateau réagissant sur celle du collecteur, il en résulte que celui-ci acquiert la faculté de se charger d'une plus grande quantité de fluide.

Ce fluide dont il se charge est dissimulé tant que le collecteur reste appliqué sur le plateau inférieur, mais il se manifeste aussitôt qu'on sépare les deux plateaux l'un de l'autre. L'électrophore et le condensateur ont beaucoup d'analogie avec la bouteille de Leyde, ces trois

appareils ayant pour principe l'influence exercée à distance par un corps électrisé sur la charge d'un autre corps. La bouteille de Leyde n'est qu'un condensateur à surface courbe. Dans le condensateur, on emploie la présence d'un corps non isolé pour augmenter la charge d'un corps isolé; dans l'électrophore, c'est le corps isolé et électrisé qui détermine cette augmentation de charge dans le corps non isolé.

Pouvoir des pointes.

Nous avons vu que la matière électrique se distribue sur la surface des corps à raison de leur forme, et nous pouvons ajouter que sa densité est beaucoup plus grande sur les parties aiguës que sur celles qui sont arrondies; de là la double action des pointes pour lancer ou pour soutirer le fluide électrique dont les corps conducteurs sont chargés. Si l'on fixe une aiguille sur un conducteur de machine électrique, le fluide se portera vers la pointe pour s'y condenser; mais sa pression devenant considérable vaincra bientôt la résistance de l'air, et le fluide s'échappera par cette pointe à mesure qu'il sera fourni par le conducteur; si l'on présente une pointe à un conducteur chargé d'électricité, cette électricité fera sortir la pointe de son état naturel, attirera vers la partie antérieure la matière électrique de nature contraire à la sienne, et repoussera dans le sol celle de même nature.

La pointe agira à son tour sur le conducteur; elle tendra à attirer son électricité, et cette action sera si forte dans certaines circonstances, qu'elle enlèvera l'électricité au conducteur même à une distance de 5 à 6 mètres. Franklin a, le premier, fait usage de ces pouvoirs des pointes pour prévenir les ravages de la foudre. Ce qu'on appelle *la foudre* est l'écoulement subit à travers l'air, sous la forme d'un trait lumineux, de la matière électrique dont était chargé un nuage orageux. Cette matière tend à se répandre dans les conducteurs et à s'y mettre en équilibre; elle préfère ceux qui sont les plus parfaits et qui, par leur forme, l'attirent davantage; de plus, elle se partage entre ceux qui forment un système continu en raison de l'étendue de leurs surfaces : il suit de là que si l'on fait communiquer un corps qui en soit chargé avec la surface immense de la terre, il n'en conservera pas sensiblement.

Paratonnerre.

Un paratonnerre est un conducteur que la matière de la foudre choisit de préférence aux corps environnants pour se rendre dans le sol. C'est une barre de fer élevée sur l'édifice qu'elle doit protéger et qui s'enfonce dans l'eau ou dans les terres humides, sans aucune solution de continuité. La tige du paratonnerre se termine par une pointe de platine, métal qui n'est pas susceptible de s'altérer à l'air; les conducteurs qui unissent la tige avec le sol sont des barres de fer ou des espèces de cordes formées de fils de fer tressés et enduits d'une couche de vernis gras; la corde se prolonge jusqu'au bord d'un puits où elle se rattache à une tige de fer dont l'extrémité inférieure plonge dans l'eau.

Un paratonnerre, pour qu'il ne puisse pas être dangereux, exige quelques précautions, dont la première est que le conducteur établisse

une communication très-intime entre la tige et la terre, sans quoi le paratonnerre appellerait la foudre sur le bâtiment, et il se trouverait dans l'impuissance de la conduire dans le sol.

L'expérience a fait voir qu'une tige de paratonnerre protége suffisamment contre la foudre, autour d'elle, un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur. D'après cette règle, un édifice de 120 pieds serait défendu par une tige de 30 pieds. Lorsqu'on veut élever des paratonnerres sur de grands édifices, il faut donc les multiplier de manière que leur différence d'activité ne laisse aucun espace entre elles: ils ne doivent pas non plus être trop rapprochés, sans quoi ils pourraient se nuire entre eux.

L'expérience a prouvé que les paratonnerres, lorsqu'ils sont conduits avec soin, garantissent de la foudre les édifices sur lesquels ils sont placés; on ne doit pas craindre une chute plus fréquente de la foudre sur ces édifices, car leur influence s'étend à une très-petite distance, pour qu'ils provoquent la foudre du nuage à se précipiter sur eux : d'ailleurs, l'observation a prouvé que les édifices armés de paratonnerres ne sont pas foudroyés plus fréquemment qu'avant qu'ils le fussent.

Pour nous rendre compte de l'effet du paratonnerre, supposons un nuage électrisé vitreusement, placé au-dessus de lui. L'action à distance de l'électricité vitrée décomposera le fluide naturel du paratonnerre et des conducteurs avec lesquels il communique, repoussera le fluide vitré vers le sol, attirera vers les pointes le fluide résineux; là ce dernier prendra une tension qui aura bientôt excédé la résistance que l'air lui oppose, et, se portant vers le nuage, il neutralisera l'électricité vitrée répandue sur la surface. Si le nuage est très-voisin et électrisé d'une manière intense, il est possible que ce rapide écoulement de l'électricité résineuse fournie par le paratonnerre ne suffise pas; alors une explosion peut avoir lieu, mais elle se portera nécessairement sur la pointe, puisque c'est là évidemment que l'action électrique agit avec le plus d'intensité. Le bruit que la foudre fait entendre en tombant cause ordinairement beaucoup d'effroi; et cependant tout le danger est déjà passé : il n'en existe même plus pour la personne qui a vu l'éclair; car si elle devait être foudroyée, elle ne verrait ni n'entendrait le coup qui serait prêt à la frapper.

Choc en retour.

On a vu souvent dans des moments d'orage des hommes et des animaux morts subitement à l'instant d'une explosion, quoique la foudre ait éclaté à une grande distance du lieu où ils se trouvaient. Voici l'explication de ce phénomène : soit un nuage d'électricité résineuse et soit une personne placée à une assez petite distance du nuage pour que la décomposition du fluide naturel de ses organes ait lieu, son électricité vitrée sera attirée par le nuage, et l'électricité repoussée dans le sol; si, dans le moment où la personne sera fortement chargée d'électricité vitrée, un objet quelconque détermine l'explosion du nuage, l'électricité résineuse, repoussée dans le sol par la présence du nuage, rentrera subitement dans la personne, et la secousse qui en résultera pourra lui donner la mort.

Développement de l'électricité par le simple contact

Galvani remarqua le premier que la cuisse d'une grenouille écorchée éprouvait de fortes convulsions, lorsqu'on établissait entre les muscles et les nerfs une communication par un arc métallique; il observa que ces convulsions étaient faibles lorsque l'arc était d'un seul métal, et que pour les rendre fortes et durables il fallait employer le contact de deux métaux différents. Ce sont ces faits qui ont conduit Volta à la découverte de l'appareil électromètre, l'un des instruments les plus précieux que possède la physique. Il reconnut bientôt que la véritable cause des phénomènes résidait dans l'arc métallique, que c'était le contact de deux métaux différents qui déterminait l'action électrique, et que l'électricité produite par ce contact se transmettait à travers les organes de la grenouille, excitait dans ces organes éminemment irritables ces convulsions observées par Galvani. Volta posa ainsi la base d'une nouvelle théorie relative au développement de l'électricité par le simple contact : deux corps de nature différente mis en contact agissent sur leur fluide naturel, de manière que l'un se constitue à l'état d'électricité vitrée et l'autre à l'état d'électricité résineuse. Cette action électrique ne se produit qu'au contact immédiat, et disparaît lorsqu'on interpose entre le corps une légère couche de vernis. Si l'on prend deux disques métalliques, l'un de zinc et l'autre de cuivre, et qu'on les mette en contact en les tenant par des tiges isolantes de verre, après leur séparation on trouvera que le disque de zinc a acquis une certaine quantité d'électricité résineuse. Cette quantité d'électricité développée par un seul contact est très-faible et ne devient sensible que par l'accumulation dans un condensateur.

PILE VOLTAÏQUE.

On a remarqué qu'il y avait avantage à souder ensemble des disques de zinc et de cuivre, dont l'action mutuelle développe l'électricité dans un pareil couple. L'action galvanique a pour effet de séparer les deux électricités dont le fluide naturel des disques est formé, et elle tend continuellement à les refouler en sens contraire vers les extrémités. Si ces extrémités sont isolées, il s'établit dans le couple un état d'équilibre ou de tension électrique. Les deux électricités s'accumulent chacune au-dessous de la surface vers laquelle elles sont portées, jusqu'à ce que leur tendance à se réunir contre-balance l'action contraire que le couple exerce pour les séparer. Supposons qu'après avoir placé un pareil couple sur un isoloir, on le couvre d'une rondelle de drap imbibé d'eau et qui ne fait que l'office de conducteur, et qu'on mette dessus un second couple semblable au premier: dans ce cas, par l'intermédiaire du conducteur, les deux couples agiront l'un sur l'autre, et il s'établira dans ce système un nouvel état d'équilibre. Cet état changera encore si l'on superpose de nouveaux couples en les séparant toujours les uns des autres par des rondelles de drap mouillé. On formera ainsi une pile de plaques dans lesquelles la distribution des fluides électriques sera telle, que les disques à égale distance, ou extrêmes, auront la même densité électrique, l'un étant électrisé vitreusement et l'autre résineusement. De plus, cette densité électrique

ira en augmentant depuis le milieu de la pile jusqu'aux extrémités, où elle dépendra du nombre total des couples. Si l'on fait passer cette pile de l'état d'isolement à celui de communication avec le sol par l'une de ses extrémités, par exemple par l'extrémité *cuivre*, cette extrémité sera dans l'état naturel, tandis que tout le reste de la pile se trouvera à l'état vitré. Enfin, si l'on établit une communication entre les deux extrémités ou les pôles de la pile, par un conducteur métallique formant un circuit non interrompu avec les différents couples, il n'y aura plus alors de tension aux deux pôles; les deux fluides dégagés par l'action continue de la pile se retiendront en sens opposé dans le fil conducteur, et donneront naissance à ce qu'on désigne sous le nom de *courant électrique*.

Au lieu de poser les plaques métalliques les unes sur les autres en colonne verticale, on peut les placer de champ à une certaine distance les unes des autres, sur des supports isolés, en fermant inférieurement et latéralement avec des corps non conducteurs l'espace qui les sépare, et de manière à produire des auges que l'on remplit ensuite d'un liquide conducteur. On a de cette manière une pile horizontale nommée *pile à auge*. Le liquide dont on fait usage est ordinairement une dissolution saline ou acidulée. Beaucoup de substances peuvent être employées pour former une pièce; mais l'expérience a prouvé que le zinc et le cuivre sont les deux corps qui méritent la préférence, parce qu'ils développent par leur contact plus d'électricité que les autres corps.

Effets produits par la pile voltaïque.

Effets physiologiques de la pile. — Si l'on attache deux fils métalliques aux deux pôles d'une pile et qu'on approche ces fils l'un de l'autre, ils s'attireront et resteront unis après le contact; si l'on place les deux fils l'un à côté de l'autre sur un même pôle, ils se repousseront mutuellement. En touchant à la fois avec la main les deux pôles d'une pile, on éprouve une commotion continue, qui s'étend d'autant plus loin dans les organes que le liquide de la pile est meilleur conducteur, si l'on a pris la précaution de mouiller ses mains auparavant. La commotion est beaucoup plus sensible en faisant communiquer un des pôles de la pile avec le réservoir commun et l'autre pôle avec le crochet d'une bouteille de Leyde, que l'on tient par la garniture extérieure; on charge la bouteille d'électricité vitrée ou d'électricité résineuse, suivant qu'elle communique avec le pôle zinc ou avec le pôle cuivre. Lorsqu'on touche à la fois les deux pôles d'une pile avec un fil métallique, on observe une étincelle à l'endroit du contact, et si la pile est assez forte, le métal s'échauffe, devient rouge, rouge-blanc et souvent même il se fond et se volatilise.

Effets chimiques de la pile. — Enfin la pile a la propriété de décomposer l'eau, les acides, les oxydes et les sels. La décomposition de l'eau s'opère facilement par l'action électrique de la pile. On met de l'eau dans un tube de verre recourbé, et l'on ferme les deux ouvertures avec des bouchons de liége, au travers desquels passent des fils métalliques. Dès que l'on a mis ces fils en communication avec le pôle de la pile, on voit se dégager de l'eau des bulles gazeuses qui viennent occuper les espaces compris entre le liquide et le bouchon. On vérifie facile-

ment que le gaz dégagé dans l'espace auquel aboutit le fil vitré est de l'oxygène pur, et celui dégagé dans l'autre espace par lequel passe le fil résineux est de l'hydrogène pur.

Effets physiques de la pile. — Les courants peuvent produire, comme les décharges des batteries ordinaires, de la chaleur, de la lumière et du magnétisme; ce dernier effet, et l'action mutuelle que les courants exercent les uns sur les autres, constituent l'*électro-magnétisme*.

L'effet de l'appareil de Volta et l'intensité des phénomènes dépendent tout à la fois du nombre des couches et des dimensions des pièces. Cependant cette dernière circonstance ne paraît pas faire varier sensiblement la force de la commotion, tandis qu'elle contribue beaucoup à la volatilisation des métaux. Une pile à larges plaques, même lorsqu'il n'y a qu'un petit nombre de couples, peut enflammer plusieurs centimètres de fil de fer, et en augmentant le nombre de ces couples à plaques larges, on peut porter à l'extrême, l'énergie des effets. Pour se rendre compte de ces circonstances, il suffit d'observer que la commotion n'est pas, comme dans les appareils électriques proprement dits, un effet instantané, mais plutôt le résultat de petites secousses qui se succèdent avec une grande rapidité. Or, plus les disques sont grands, plus il faut de temps au fluide pour acquérir sur chaque point de leur surface le même degré d'accumulation; ainsi, tout le reste d'ailleurs égal, dans la pile à disques plus grands les secousses seront plus fortes, mais elles se succéderont avec plus de lenteur; en sorte que, dans le même temps, la somme totale des effets reproduits sur nos organes est la même; mais lorsqu'il s'agit de combustion, l'intensité est plus grande. Portez le phénomène à un plus grand degré d'énergie, et la combustion commencée avec plus de force conservera cette force.

MAGNÉTISME.

Parmi les différents minerais de fer que le globe renferme dans son sein, il en est un qui a la propriété d'attirer l'autre fer, et de lui communiquer la même vertu; il porte dans le langage ordinaire le nom d'*aimant*. On distingue dans un aimant deux points opposés où la propriété attractive a plus de puissance. Si l'on coupe dans un aimant une lame dont l'axe passe par ces points, et qu'on la suspende librement sur un pivot, on formera ainsi ce que l'on appelle une *aiguille aimantée*. Supposons maintenant que l'on choisisse à volonté une des extrémités d'un aimant, et qu'on le présente successivement aux deux extrémités d'une aiguille aimantée, il y aura attraction d'une part et répulsion de l'autre entre les deux aimants. En général, il y a dans chaque aimant deux points opposés qui manifestent des actions contraires, et auxquels on a donné le nom de *pôles*. Lorsqu'on présente ainsi un aimant un peu fort à une aiguille aimantée, on voit celle-ci se détourner de sa première position et, après plusieurs oscillations, se fixer dans une direction déterminée; or, ce qui est extrêmement remarquable, une aiguille aimantée abandonnée librement à elle-même exécute les mêmes mouvements et finit toujours par se diriger sur une ligne qui va du nord au sud. Le globe terrestre fait donc à l'égard de cette aiguille les mêmes fonctions que l'aimant dont nous venons de

parler. On conçoit les effets magnétiques produits par l'action de deux fluides, comme les effets électriques; les molécules de chacun d'eux se repoussent les unes les autres, et attirent celles des autres fluides. Combinées, elles composent le fluide naturel dont chaque corps est pourvu; séparées, elles agissent pour produire le phénomène de l'aimant. La remarque que nous avons faite sur le magnétisme du globe nous fournit des démonstrations pour distinguer l'un de l'autre ces deux sortes de fluide. Il est naturel d'appeler *boréal* celui qui domine dans la partie boréale du globe, et *austral* celui qui domine dans l'hémisphère austral; et parceque dans une aiguille aimantée, librement suspendue, le pôle, qui est tourné vers le nord, est dans l'état contraire à celui du pôle de notre globe qui est dans la même partie, on voit qu'il convient de donner le nom de pôle austral à l'extrémité de l'aiguille qui est tournée vers le nord, et celui de pôle boréal à l'extrémité opposée; et puisque ce sont les fluides de nom contraire qui s'attirent, il en résulte que c'est le pôle austral d'une aiguille qui se dirige vers le nord et son pôle boréal vers le sud.

Plus le métal est dur, plus les deux fluides éprouvent de difficultés à se développer et à se mouvoir dans ses particules; mais aussi ils ont plus de peine à recomposer le fluide naturel, et le magnétisme se conserve plus longtemps: de là la différence que l'on observe entre le fer doux et l'acier trempé. Relativement à la communication du magnétisme dans le fer doux, le dégagement des deux fluides se fait plus facilement sous l'influence d'un corps magnétique, mais le retour à l'état de combinaison s'opère ensuite avec la même facilité, aussitôt que le corps est soustrait à cette influence. Le fer doux ne peut donc acquérir qu'un magnétisme passager; l'acier, au contraire, beaucoup plus difficile à aimanter, conserve aussi plus longtemps sa vertu, et c'est pour cela que les barreaux d'acier sont seuls employés pour faire des aimants artificiels.

Aimantation due au courant électrique.

On peut développer le magnétisme sans employer l'aimant, par la seule présence de l'électricité. On peut aimanter passagèrement tous les métaux au moyen d'un courant électrique, en attachant ses extrémités avec des fils métalliques aux deux pôles de la pile de Volta. Cette aimantation cesse lorsqu'on retire le métal du courant électrique. Les faits sont d'autant plus remarquables qu'on n'était parvenu pendant longtemps à aimanter que le fer, le cobalt, le nickel et quelques alliages de ces trois métaux.

Un fil de fer non aimanté devient susceptible d'attirer la limaille de fer, lorsqu'il est en présence d'un fil électro-magnétique formé de métal quelconque.

M. Arago a découvert que des aiguilles d'acier peuvent être aimantées très-promptement, et d'une manière permanente, par le moyen de l'électricité. Il suffit pour cela d'introduire ces aiguilles dans l'intérieur d'une sphère cylindrique formée par un fil de métal électrisé; il n'est pas nécessaire que ce fil aboutisse aux pôles de la pile voltaïque, on obtient les mêmes effets au moyen d'étincelles formées par la machine électrique. Il est à remarquer que la même

aiguille placée hors de la sphère ne donne aucun signe de magnétisme.

DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

En 1820, M. Œrsted, professeur à Copenhague, fit la découverte fondamentale sur laquelle repose l'électro-magnétisme: il trouva le moyen de faire agir l'électricité sur le magnétisme d'une manière sûre et permanente. Pour que les fluides électriques agissent sur le magné tisme, il suffit qu'ils soient en mouvement. En effet, un fil conducteur étant traversé par le courant de la pile, si l'on en approche une aiguille aimantée librement suspendue, on la voit qui se dévie, qui se tourne, s'agite et qui fait une foule d'oscillations sans être attirée ni repoussée, à moins qu'elle ne soit très-près. La force qui produit ces mouvements dans l'aiguille est ce qu'on appelle la *force électro-magnétique.*

Il est facile de constater par l'expérience :

1°. Qu'elle diminue à mesure que la distance augmente entre le courant et l'aiguille;

2°. Qu'elle s'exerce dans tous les sens et au travers de toutes les substances, excepté au travers des substances magnétiques.

De plus, elle est une force active, ne s'exerçant pas seulement sur le magnétisme libre de l'aiguille, mais s'exerçant aussi sur le magnétisme combiné, pour le décomposer quand elle peut vaincre la force coercitive.

Multiplicateur de Schweiger. — Peu de temps après la découverte de M. Œrsted, M. Schweiger imagina le galvanomètre, que l'on appelle aussi *multiplicateur*, parce qu'il multiplie en effet la force électro-magnétique, et qu'il est d'une sensibilité merveilleuse pour découvrir les moindres traces de l'électricité en mouvement. Le multiplicateur repose sur ce principe, qu'un courant, ayant en général une forme rentrante quelconque, agit par toutes ses parties pour diriger dans le même sens une aiguille aimantée qu'il enveloppe de toutes parts; ainsi un fil conducteur, enroulé sur lui-même et formant cent tours, doit, quand il est traversé par le même courant, produire un effet cent fois plus grand qu'un fil d'un seul tour; seulement il faut que les fluides parcourent toutes les circonvolutions du fil sans passer latéralement d'un contour à l'autre. C'est une condition facile à remplir. On prend pour cela un fil d'argent ou de cuivre rouge, de 20 à 25 mètres de longueur, de quelques fractions de millimètre d'épaisseur, et revêtu d'un fil de soie dont les tours sont tellement serrés, que l'on n'aperçoit plus le métal; on l'enroule sur un petit cadre en bois, à peu près comme du fil sur une bobine; seulement on laisse libres 60 centimètres environ de longueur à chaque extrémité : c'est ce qu'on appelle les *deux fils du multiplicateur.* Le courant doit entrer par l'un et sortir par l'autre. L'aiguille aimantée qui doit servir d'index est suspendue à un fil de cocon, et tout l'appareil est recouvert d'une cloche qui le garantit des agitations de l'air. Lorsque l'on veut faire une expérience, on tourne le cadre dans la direction du méridien magnétique. L'aiguille est alors dans le plan du cadre, et l'effet du courant la dévie de cette position d'un angle plus ou moins grand, sui-

vant qu'il est plus ou moins énergique; dans cette position, la force électro-magnétique est combattue par la force magnétique de la terre qui agit incessamment sur l'aiguille, pour la ramener dans le méridien magnétique.

Le multiplicateur est un instrument sûr et commode pour constater le développement de l'électricité par le contact des corps, et même pour déterminer l'espèce d'électricité qui appartient à chacun d'eux. Par exemple, pour voir l'électricité qui se développe au contact du zinc et du cuivre, on adapte un petit disque de zinc à l'un des fils et à l'autre un disque de cuivre pareil; sur l'un de ces disques on met une rondelle de papier mince, mouillée d'eau pure, et ensuite on les approche en les pressant l'un et l'autre contre la rondelle : à l'instant l'aiguille du multiplicateur est vivement agitée; elle pourrait même décrire plusieurs circonférences avant de s'arrêter, tant est énergique l'action qu'elle éprouve. Ce n'est pas au contact des disques que se développe l'électricité, puisqu'ils sont séparés par la rondelle mouillée, mais c'est au contact du zinc avec le fil de cuivre. Pour reconnaître que le zinc prend la vitrée et le cuivre la résineuse, il suffit de remarquer que le courant qui traverse le multiplicateur entre, en effet, par l'extrémité du fil à laquelle est adapté le disque de cuivre.

En substituant au disque de zinc un disque d'un autre métal quelconque, on reconnaîtra de la même manière l'espèce d'électricité qu'il développe par son contact avec le fil de cuivre.

Direction des courants par l'influence du magnétisme de la terre. — Quand on eut constaté l'action des courants sur les aimants, on ne pouvait pas douter qu'il n'y eût de la part des aimants une réaction capable de diriger les courants et de les mouvoir de diverses manières. Entre tous ces phénomènes inverses des précédents, ceux qui devaient résulter de l'action magnétique de la terre se présentaient comme les plus curieux à examiner, et l'on essaya, en effet, de disposer des courants mobiles pour étudier les modifications qu'ils éprouveraient en les abandonnant, comme des boussoles, à l'influence du magnétisme terrestre. Ces premiers essais n'ont pas donné de résultats satisfaisants, parce qu'il était difficile de donner au courant toute la mobilité désirable. Enfin M. Ampère parvint à lever toutes ces difficultés par un mode ingénieux de suspension qui s'applique avec avantage à tous les courants mobiles.

Direction des courants par les aimants. — Ce que nous venons de dire sur la direction que le magnétisme de la terre imprime aux courants mobiles, suffit pour indiquer la plupart des effets qui seront produits par l'action des aimants; mais comme la terre agit sans cesse, il faudra, pour ne pas compliquer les expériences, employer des appareils dans lesquels son influence se détruise d'elle-même.

On doit à M. de la Rive plusieurs expériences ingénieuses par lesquelles il fait voir que des courants très-faibles peuvent être dirigés par les aimants, ou même par l'action magnétique de la terre. Ces petits appareils sont des courants flottants dont on peut varier la forme à volonté. Dans un morceau de liége destiné à flotter sur un large vase d'eau acidulée, on fait passer une petite feuille de zinc qui est soudée à un ruban ou à un fil de cuivre; après avoir décrit une circonfé-

rence et diverses circonvolutions, ce fil de cuivre vient à son tour passer dans le liége et plonger dans l'eau acidulée à une petite distance de la feuille de cuivre. Dès que l'appareil est sur l'eau, le courant s'établit dans la direction des flèches, et il est assez sensible pour être dirigé par la terre, et à plus forte raison pour être attiré ou repoussé par les aimants.

TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

Après Volta, qui trouva la pile électrique et son courant; après Œrsted, qui découvrit l'action du courant sur l'aiguille aimantée, viennent les travaux de M. Arago, qui reconnut que le courant produisait des aimants très-énergiques par son action sur des barres de fer doux entourées de fils conducteurs de l'électricité. Une fois en possession de cette énergique action, la télégraphie électrique a tout osé. Elle a fait parcourir à des aiguilles, analogues à des aiguilles de montre, les divers points d'un cadran où sont écrites les lettres et les chiffres que l'on veut indiquer à son correspondant. Ce que le courant fait à Paris, il le fait à Marseille, et l'indication du cadran de Paris se répète fidèlement à 1000, à 2000, à 3000 kilomètres. Bien plus, comme l'aimant instantané produit dans l'expérience de M. Arago peut être rendu plus ou moins énergique à volonté, on peut développer assez de force pour faire imprimer la lettre que l'on a amenée devant le papier à dépêches, ou bien on peut marquer sur ce papier des points, des traits, des combinaisons de ces deux signes, soit avec de l'encre, soit à la pointe sèche, en rayant ou perçant le papier; en un mot, l'action de l'aimant qui peut tirer, pousser, frapper, presser, etc., doit être considérée comme l'action d'une main que l'on pourrait étendre de Paris à Marseille, ou de New-York à la Nouvelle-Orléans, c'est-à dire à plusieurs mille kilomètres de distance.

ACOUSTIQUE.

L'acoustique a pour objet de déterminer les lois suivant lesquelles le *son* se produit dans les corps et se transmet ensuite jusqu'à nos organes.

De la production du son et de sa transmission dans l'air atmosphérique. — Le son est un mouvement particulier excité dans la matière pondérable. Si l'on écoute un son et qu'en même temps on observe la cause qui le produit, on remarque que la cause a cessé d'agir avant que le son soit parvenu jusqu'à notre organe : ainsi, dans l'explosion d'une arme à feu, on voit la lumière avant d'entendre le coup, pourvu qu'on soit placé seulement à la distance de quarante à cinquante pas : à une moindre distance, la lumière et le coup semblent frapper en même temps l'œil et l'oreille; et à mesure que la distance augmente, le temps qui s'écoule entre l'apparition de la lumière et la perception du bruit devient de plus en plus sensible. D'après cela, on peut juger que plusieurs observateurs placés sur une même ligne à cent pas les uns des autres n'entendraient pas au même instant le bruit qui serait excité à l'une des extrémités de cette ligne aux pieds du premier observateur : celui-ci entendrait le son avant tous les autres; le deuxième l'entendrait avant le troisième, etc.; et, ce qu'il

importe de remarquer aussi, c'est qu'au moment où le troisième observateur entendrait le son, le premier et le deuxième ne l'entendraient plus, tandis que le quatrième et les suivants ne l'entendraient pas encore. On peut donc conclure de cette expérience qu'un son brusque et instantané, comme celui qui résulte d'un choc ou d'une explosion, passe successivement d'un lieu à un autre; qu'il n'est jamais entendu que dans un lieu à la fois et que, par conséquent, il est un mouvement particulier dont notre organe est affecté. On peut démontrer par des expériences très-simples que le son ne peut pas se propager dans le vide : là où il n'y a pas de matière pondérable, il n'y a plus de véhicule du son. Le son diminue d'intensité par une double cause, à mesure qu'il s'élève dans l'atmosphère : il diminue parce que la distance augmente et parce que l'air dans lequel il pénètre est de plus en plus raréfié. Les bruits les plus violents qui retentissent sur la terre ne peuvent pas sortir des limites de l'atmosphère; ils s'affaiblissent à mesure qu'ils en approchent et s'éteignent sans pouvoir les franchir. L'air ne peut être considéré comme le seul conducteur du son, puisque tous les corps élastiques le propagent aussi. On croit généralement que le son se propage dans l'air par une succession de vibrations concentriques semblables à celles qui se produisent sur la surface d'une pièce d'eau quand on y jette un caillou. Le corps sonore est le centre du mouvement, et les ondulations diminuent en force à mesure qu'elles s'éloignent de ce centre, jusqu'à ce qu'elles deviennent trop faibles pour affecter le nerf auditif.

Vitesse du son. — La vitesse du son est constante; il parcourt des espaces proportionnels aux temps : la vitesse du son dans l'air est de 340 mètres par seconde à 16 degrés. On a fait de nombreuses expériences en différents lieux de la terre pour déterminer avec exactitude la vitesse du son. Ces expériences offrent dans leurs résultats des différences assez considérables : néanmoins, en prenant une moyenne entre les résultats différents, on trouve 340^{m},88 pour l'espace que le son a parcouru en une seconde, la température étant de 16 degrés centigrades.

Un son fort et un son faible ont la même vitesse. La direction et la force du vent ont une grande influence sur la vitesse du son : si elle concourt avec la direction de la propagation du son, elle l'augmente; si elle lui est opposée, elle l'affaiblit; enfin, dans le cas où elle lui est perpendiculaire, la vitesse du son n'en est nullement altérée.

Lois générales des vibrations des cordes et des sons harmoniques qu'elles produisent. — Lorsqu'on pince une corde tendue sur un instrument quelconque, comme une harpe ou une guitare, les vibrations qu'elle accomplit sont beaucoup trop rapides pour que l'on puisse en compter le nombre absolu; cependant on peut alors distinguer assez nettement deux phénomènes remarquables : premièrement le son *monte* et devient plus aigu dès qu'on raccourcit la corde ou qu'on lui donne une plus forte tension, et secondement le nombre des vibrations augmente d'une manière sensible. Ainsi il y a certainement une dépendance entre le son de la corde, sa longueur, sa tension et la rapidité de ses vibrations; mais cette dépendance, si facile à constater par l'expérience, ne peut être déterminée que par le secours du

calcul ; elle constitue ce qu'on appelle en mécanique le *problème des cordes vibrantes*.

Voici les résultats auxquels on arrive par le calcul et qui expriment les lois de vibrations des cordes :

1°. Les nombres de vibrations d'une corde sont en raison inverse de sa longueur ;

2°. Les nombres de vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent ;

3°. Les nombres de vibrations des cordes de même matière sont en raison inverse de leur épaisseur ou de leur diamètre ;

4°. Les nombres de vibrations des cordes de matières différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.

Ces principes une fois posés, il devient très-facile de représenter les sons par des nombres. On se sert pour cela d'un instrument qui donne des sons purs, et qui permettent de mesurer avec exactitude les longueurs des cordes. Cet instrument s'appelle *sonomètre* ou *monocorde ;* il porte une corde à boyau et une corde de métal, pour montrer qué sur l'une et sur l'autre les effets sont les mêmes. La corde est attachée à un crochet C (*fig.* 50, *Pl. III*), passe sur les chevalets fixes F et F′, sur une poulie mobile M, et s'attache à un autre crochet C′ auquel on suspend le poids P. Le chevalet mobile HH′ peut glisser sous la corde sans la toucher, on l'arrête où l'on veut, et, pour réduire la longueur de la corde, il suffit de la presser avec le doigt sur l'arête T de ce chevalet ; la caisse SS′ sert à renforcer le son. Supposons maintenant que la corde soit convenablement chargée pour rendre un son plein et pur en vibrant à vide, que l'on prenne ce son pour point de départ, ou pour le *do*, et qu'on avance peu à peu le chevalet pour obtenir successivement les autres notes de la gamme, *ré, mi, fa, sol, la, si, do*. La longueur de la corde étant représentée par 1, on trouvera pour les autres notes les longueurs suivantes :

Noms des sons.......	*do*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
Longueurs des cordes.	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$

Mais les nombres de vibrations de la corde étant en raison inverse de sa longueur, on aura, en représentant par 1, le nombre des vibrations qui donnent le *do :*

Noms des sons.......	*do*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
Nombre des vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

On sait que l'intervalle de *do* à *ré* s'appelle une *seconde ;* de *do* à *mi*, une *tierce ;* de *do* à *fa*, une *quarte ;* de *do* à *sol*, une *quinte ;* de *do* à *la*, une *sixième ;* de *do* à *si*, une *septième ;* de *do* à *do*, une *octave*, etc. Ainsi, quand deux sons font l'octave, le nombre des vibrations du plus aigu est double du nombre des vibrations du plus grave ; pour la tierce, le plus grave fait 4 vibrations, et le plus aigu 5 ; pour la quarte, le plus grave 3, et le plus aigu 4 ; pour la quinte, le plus grave 2, et le plus aigu 3, etc. Ces rapports sont invariables,

l'oreille n'y tolère aucune altération, c'est-à-dire qu'il faut pour que deux sons soient à l'octave, que le nombre des vibrations du plus aigu, divisé par le nombre des vibrations du plus grave, donne 2; qu'il donne $\frac{3}{2}$ pour la quinte, etc. Ces sons ne sont pas les seuls que l'on emploie dans la musique : on emploie aussi des *dièses* et des *bémols*. Mais il est facile de s'assurer, au moyen du monocorde, par des expériences analogues aux précédentes, que *diéser* un son, c'est multiplier le nombre de ses vibrations par $\frac{25}{24}$, et que le *bémoliser*, c'est le multiplier par $\frac{24}{25}$. Ainsi, tandis que le *do*, par exemple, fait 24 vibrations, le *do dièse* en fait 25, et tandis que le *si* fait 25 vibrations, le *si bémol* n'en fait que 24.

Lorsque deux sons s'approchent tellement de l'unisson, que l'un d'eux fait 80 vibrations, tandis que l'autre en fait 81, en sorte que leur intervalle ou leur rapport soit $\frac{80}{81}$, on dit qu'ils ne diffèrent que d'un comma. Les organes exercés sentent très-bien cette différence.

Lorsqu'on fait résonner ensemble deux sons qui sont à l'octave, ou à la tierce ou à la quinte, ils forment une consonnance ou un accord; au contraire, la seconde ou la septième forment une dissonance.

Les sons harmoniques sont ceux qui suivent la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, etc.; le 2ᵉ est l'octave du 1ᵉʳ; le 3ᵉ en est la douzième ou la double quinte; le 4ᵉ la double octave; le 5ᵉ la dix-septième ou la triple tierce, etc.; ainsi, ils ne forment jamais de dissonance; c'est sans doute pour cette raison qu'on les appelle *sons harmoniques*. Mais un phénomène remarquable est l'existence simultanée de tous ces sons dans les vibrations d'une seule corde. En effet, si l'on met en mouvement avec l'archet une corde de violon ou de violoncelle, on n'entend pas seulement le *son fondamental* de cette corde, celui qu'elle rend en vibrant dans toute sa longueur, mais on entend encore le son 3 ou sa douzième et le son 5 ou sa dix-septième; il y en a même qui prétendent démêler aussi le son 6 ou sa dix-neuvième.

Diapason. — Le diapason est un instrument que l'on emploie pour régler le ton des instruments. Il consiste en un barreau d'acier recourbé sur lui-même un peu au delà du parallélisme des deux branches, et pouvant se poser sur un pied attaché à la courbure. Lorsqu'on tient l'instrument par le pied, et qu'on introduit entre ses branches et près de la courbure un morceau de fer un peu trop gros pour sortir librement entre les extrémités, si l'on tire subitement ce morceau de fer, les deux branches entrent en vibration et produisent un son constant qui est peu sensible par lui-même, mais qui devient considérable en posant le diapason sur la caisse d'un instrument de musique. Ce son est, du reste, beaucoup plus grave que ne semblerait comporter la longueur des tiges métalliques.

OPTIQUE.

Un corps lumineux quelconque propage la lumière dans tous les sens. La flamme d'une bougie, par exemple, serait visible de tous les points d'une sphère dont elle occuperait le centre ; il en serait de même d'un corps phosphorescent, d'une étincelle électrique, d'un boulet porté au rouge par l'action du feu. Ce qui se montre en petit dans nos expériences habituelles, se manifeste en grand dans l'immense étendue du ciel. Le soleil répand de toutes parts le même éclat dans l'espace, et sa lumière brille à la fois sur la terre, sur les planètes et sur tous les corps du firmament, quel que soit le point qu'ils occupent dans la sphère infinie du monde. Les effets de la lumière pénètrent à travers tous les gaz, la plupart des liquides, particulièrement l'eau, et beaucoup de corps solides, parmi lesquels on doit surtout distinguer le verre. De semblables corps prennent le nom de *transparents;* d'autres retiennent la lumière et s'appellent corps *opaques.*

La première loi des mouvements de la lumière est la suivante : Dans un milieu homogène la lumière se propage toujours en ligne droite. En disposant, par exemple, sur une longue règle trois disques percés en leur centre d'un trou très-petit, on voit à une grande distance la flamme d'une bougie, ou bien on cesse de l'apercevoir, suivant que les trous sont ou ne sont pas en ligne droite. Quand la lumière vient rencontrer une glace polie, suivant une certaine direction, elle est renvoyée suivant une autre direction, et elle continue de se mouvoir en ligne droite, suivant cette nouvelle direction, tant qu'elle reste dans un milieu sensiblement homogène. Cette déviation que la lumière éprouve en tombant sur des surfaces polies, s'appelle *la réflexion* de la lumière.

Dans un milieu hétérogène la lumière se meut toujours en ligne courbe; la déviation que la lumière éprouve en traversant des milieux hétérogènes s'appelle *la réfraction.*

Un *rayon lumineux* ou un *rayon de lumière* est la direction que suit la lumière en se propageant; un *pinceau* est la réunion de plusieurs rayons voisins; un *faisceau* est la réunion de plusieurs rayons ou de plusieurs pinceaux voisins ou séparés..

L'intensité de la lumière d'un point lumineux décroît comme le carré de la distance augmente.

Les corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes se distinguent en corps *opaques*, comme le bois, la pierre et les métaux; corps *diaphanes* ou *transparents,* comme l'air, l'eau et le verre; et corps *translucides*, comme le papier mince et le verre dépoli.

Les corps *opaques* ne transmettent point de lumière au travers de leur masse; mais l'opacité est plutôt dépendante de l'épaisseur que de la nature des substances, car tous les corps réduits en lames ou en feuilles assez minces, laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent.

Les corps *diaphanes* transmettent la lumière et laissent apercevoir nettement, au travers de leurs substances, toutes les formes des objets. Les gaz, les liquides et la plupart des corps cristallisés semblent,

en général, avoir une diaphanéité parfaite lorsqu'ils sont absolument incolores, et ils laissent apercevoir non-seulement les formes des objets, mais encore toutes les nuances de leurs couleurs. Cependant les plus diaphanes deviennent colorés, quand ils ont une épaisseur suffisante, et c'est une preuve qu'ils absorbent alors une partie de la lumière qui les traverse.

Les corps *translucides* laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent, mais ils ne laissent distinguer ni la couleur, ni la distance, ni la forme des objets. Dans le langage ordinaire, le mot *transparent* s'applique souvent aux corps translucides comme aux corps diaphanes.

De l'ombre et de la pénombre. — L'ombre est le lieu de l'espace qui ne reçoit aucune lumière, et la pénombre est l'ensemble des lieux qui sont dans l'ombre par rapport à quelques-uns des points, tandis qu'ils reçoivent la lumière des autres.

Vitesse de la propagation de la lumière. — La vitesse de la lumière est prodigieuse; les observations astronomiques offrent des moyens de la mesurer avec une grande précision. La première application en fut faite dans le mouvement du premier satellite de Jupiter : cette planète est accompagnée de quatre satellites. Jupiter projette dans l'espace une ombre conique, dont la base repose sur la partie éclairée; le premier satellite s'éclipse par son entrée dans le cône de l'ombre. Si un observateur est placé sur la terre entre Jupiter et le soleil, il reconnaît qu'il s'écoule 42 heures et demie entre deux éclipses successives; mais comme le mouvement de la terre autour du soleil est beaucoup plus rapide que celui de Jupiter, bientôt le soleil, la terre et Jupiter ne sont plus en ligne droite.

Dans une position très-éloignée de la première, l'observateur devra voir sortir le satellite du cône d'ombre au bout d'un certain nombre de fois 42 heures et demie, si la vitesse de la lumière était infinie; mais il n'en est pas ainsi, et le satellite est d'autant plus en retard que l'accroissement de la distance est devenu plus grand. Si la terre est à l'extrémité du diamètre de son orbite, le retard est de 16′ 26″; ce diamètre est de 68 à 69 millions de lieues; la vitesse de la lumière est donc de 70000 lieues par seconde; elle nous vient du soleil en 8′ 13″.

DE LA CATOPTRIQUE OU DE LA RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

Les surfaces polies réfléchissent la lumière à la manière des miroirs, même lorsqu'on regarde obliquement une surface plane non polie; on y voit quelques images semblables à celles qui se présentent dans un miroir, mais le plus souvent elles ne sont pas distinctes. Cependant, parmi ces corps solides il n'y a que quelques métaux simples et quelques alliages qui soient susceptibles de prendre un poli parfait. Les miroirs de glace rendent les miroirs métalliques inutiles pour l'usage ordinaire, mais ne peuvent être employés pour les expériences exactes d'optique, parce qu'ils font une double réflexion aux deux surfaces du verre, et aussi parce que la lumière qui parvient à la surface postérieure est elle-même réfractée deux fois dans le verre, et que, par conséquent, les phénomènes qu'on observe ne sont pas produits par la seule réflexion des rayons.

L'angle qu'un rayon incident fait avec la normale au point d'incidence, se nomme *angle d'incidence*.

L'angle qu'un rayon réfléchi fait avec la normale au point d'incidence, se nomme *angle de réflexion*.

Le plan formé par l'angle d'incidence se nomme *plan d'incidence*.

Le plan formé par l'angle de réflexion se nomme *plan de réflexion*.

Ces définitions s'appliquent à tous les rayons incidents et réfléchis, mais nous ne nous occuperons que de la réflexion régulière, et voici les lois suivant lesquelles elle s'accomplit :

1°. Le plan de réflexion coïncide avec le plan d'incidence ;

2°. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et situé de l'autre côté de la normale.

Ces deux vérités fondamentales peuvent être démontrées par une seule expérience que les astronomes ont occasion de répéter souvent et avec des instruments d'une grande précision.

Autour du centre C (*fig.* 51, *Pl. III*) d'un grand cercle vertical VV' se meut une lunette L avec laquelle on observe les étoiles. D'abord on fait une observation par la lumière directe ED, ensuite on en fait une autre par la lumière E'IR qui est réfléchie sur la surface tranquille d'un vase plein de mercure, et l'on trouve constamment que l'angle DCP est égal à l'angle PCO'. Or les verticales PC et IP' étant parallèles, ainsi que les rayons ED et E'I qui viennent d'une même étoile, il est évident que les angles DCP et PCO' sont respectivement égaux aux angles E'IP' et P'IR, et que, par conséquent, ceux-ci sont égaux entre eux ; et il est évident, en outre, que le plan d'incidence E'IP' coïncide avec le plan de réflexion P'IR.

Il n'est pas nécessaire de prouver directement que le rayon IR provient de E'I, puisqu'au point I il ne peut tomber qu'un rayon parallèle à ED

Ces deux lois de la réflexion sont tout à fait générales et ne souffrent aucune exception. Elles sont vraies pour la lumière naturelle qui nous vient des astres et pour la lumière artificielle que nous pouvons produire par la combustion, par les actions chimiques, la phosphorescence, l'électricité, etc. Elles sont vraies pour la lumière directe et pour la lumière diffuse qui nous fait voir les corps et toutes leurs couleurs diverses ; enfin elles sont complétement indépendantes de la nature des substances sur lesquelles la réflexion s'opère, car elles se vérifient avec la même exactitude sur les métaux et les pierres précieuses, sur les solides et les liquides, en un mot sur toutes les surfaces réfléchissantes, quelle que puisse être la matière pondérable qui les compose.

Au moyen de ces principes, il est facile de démontrer que les miroirs plans doivent nous faire voir des *images* des objets, et que ces images sont toujours *symétriques* des objets par rapport au plan du miroir.

Pour construire, en général, une image symétrique d'un corps, par rapport à un plan, il faut de tous les points de ce corps abaisser des perpendiculaires sur le plan, et prolonger chacune d'une quantité égale à elle-même : l'ensemble des extrémités de ces perpendiculaires prolongées forme l'image symétrique.

Réflexion sur les miroirs courbes. — On adopte en optique ce principe fondamental, que la réflexion se fait en un point quelconque d'une surface courbe, comme elle se ferait sur le plan tangent en ce point. Nous verrons tout à l'heure que ce principe est, en effet, confirmé par de nombreuses expériences; mais on pourrait aussi le démontrer directement par la théorie. Il résulte que les lois générales dont nous avons établi l'exactitude, s'appliquent sans restriction à toutes lès surfaces, quelle que soit leur courbure, et que tout se réduit à trouver pour chaque point la direction du plan tangent ou de la normale, ce qui est simplement un problème de géométrie.

Ainsi un point lumineux, placé au centre d'une sphère creuse et polie à l'intérieur, enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et chacun de ces rayons serait réfléchi sur lui-même et reviendrait directement au centre après la réflexion. De même un point lumineux placé à l'un des foyers d'un ellipsoïde enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et tous ces rayons iraient par les réflexions se réunir et se concentrer en l'autre foyer; puis, en continuant leur route, ils retourneraient au premier foyer après une seconde réflexion, reviendraient du second foyer après une troisième, et ainsi de suite.

Un point lumineux placé au foyer d'un paraboloïde enverrait des rayons qui seraient tous réfléchis parallèlement à l'axe, et s'en iraient se perdre à l'infini; réciproquement, un point placé à l'infini comme une étoile et sur l'axe d'un paraboloïde enverrait des rayons qui viendraient tous se concentrer au foyer.

Miroirs concaves. — Si l'on dirige l'axe du miroir concave vers le soleil, tous les rayons qui viennent frapper sa surface sont rassemblés par la réflexion dans un très-petit espace qui se trouve justement au milieu; non-seulement il se produit en ce point une lumière éblouissante, mais encore il s'y développe une vive chaleur dont l'intensité est très-grande. Par cette raison, on nomme cet espace le *foyer du miroir,* et la distance de ce point à la surface courbe, la *distance focale.* Pour que cet effet soit aussi fort qu'il est possible, le miroir doit être très-grand, et sa distance focale plus courte que la largeur de sa surface, ou au moins elle ne doit pas l'excéder : car, plus la distance focale est considérable, en comparaison de la surface du miroir, moins le foyer aura d'action.

Un corps qu'on veut exposer à la chaleur du foyer d'un miroir doit être plus petit que cet espace, afin d'y être environné de toutes parts par la chaleur qui y est rassemblée. Un miroir concave disposé pour cet objet se nomme *miroir ardent.*

Si l'on place une flamme dans le foyer d'un miroir concave, toute la lumière qui va frapper le miroir sera réfléchie presque parallèlement à l'axe, et comme la lumière parallèle conserve toujours une égale force, excepté lorsquelle est affaiblie par l'absorption que lui fait éprouver le milieu dans lequel elle passe, on peut propager ainsi une vive lumière à une distance considérable; on nomme *miroir collecteur* un miroir concave préparé pour cet effet.

Les images des objets que présente un miroir concave offrent des phénomènes beaucoup plus rares que ceux qu'on observe dans le

miroir plan. En plaçant une bougie allumée devant le miroir dans une chambre obscure, tous les phénomènes suivants deviennent visibles.

1°. Si la flamme est en deçà du foyer près du miroir, on en voit une image verticale et grossie qui paraît un peu plus loin derrière le miroir que la flamme elle-même n'est au devant; à mesure qu'on rapproche la lumière du foyer, l'image grandit et s'éloigne.

2°. Si la flamme est au foyer, son image ne se trouve nulle part; mais on voit seulement son reflet lumineux qui consiste en rayons parallèles.

3°. Si l'on place la lumière au delà du foyer, on n'aperçoit pas non plus son image dans le miroir; mais quand elle est à une certaine distance, il s'en peint une image grosse et renversée sur un mur blanc opposé au miroir : si l'on éloigne la lumière encore davantage, cette image est plus proche et plus petite. Quand la distance de la flamme devient double de la distance focale, l'image coïncide avec elle, parce qu'elle est alors au centre de courbure du miroir; si on la recule encore, l'image qui est alors plus petite que la flamme se rapproche du foyer, et finirait par tomber précisément dans le foyer, si l'on pouvait éloigner indéfiniment la lumière : on voit par là que dans un miroir ardent la violente chaleur qu'on observe au foyer est produite par une image du soleil qui vient s'y présenter.

Miroirs convexes. — Les phénomènes que présente un miroir convexe, quand un objet y répand sa lumière, sont beaucoup plus simples, quelque part que soit placé l'objet devant le miroir, qui en a peint toujours une image plus petite que lui, et située verticalement derrière le miroir. Quand on dirige l'axe d'un miroir convexe vers le soleil, il ne rassemble pas la lumière, il la disperse. Mais on peut prouver par l'expérience aussi bien que par le calcul que la petite image du soleil, de laquelle vient cette dépression de lumière, est placée à égale distance entre le centre optique et le centre géométrique, par conséquent derrière le miroir. Par conséquent, on nomme cette place le *foyer négatif du miroir*, et sa distance derrière le miroir, la *distance focale négative*.

Détermination de la distance focale d'un miroir sphérique. — Pour un miroir concave, on peut la déterminer en présentant le miroir aux rayons du soleil, de manière que leur direction soit parallèle à son axe, et l'on mesure la distance de l'image au miroir; ou bien on colle un morceau de papier en rond et de la grandeur du miroir, on y trace un diamètre, et l'on fait sur celui-ci deux petites ouvertures rondes : à une égale distance du centre, on attache la feuille sur le miroir, et l'on présente celle-ci à la lumière du soleil. Les rayons réfléchis par les deux ouvertures convergent, on cherche le point où ils se réunissent, et l'on mesure la distance du miroir.

Pour un miroir convexe, on ne peut employer que la seconde méthode. Quand on a attaché le papier au miroir, on voit que les rayons réfléchis divergent, et l'on doit chercher les points où ils sont entre eux à une distance double de celle qu'ils avaient sur le miroir; on mesure la distance de ces points au miroir, et l'on connaît ainsi la distance focale négative.

DIOPTRIQUE OU RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

Lois générales de la réfraction de la lumière. — La réfraction de la lumière est la déviation ou le changement de direction qu'elle éprouve en passant d'un milieu dans un autre. Tous les milieux dans lesquels la lumière peut se propager sont des *milieux réfringents*, parce que tous font changer de route aux rayons, à l'instant où ils entrent pour les traverser. Au passage du verre dans le vide, ou de l'air dans l'eau, ou en général d'un milieu dans un autre, un rayon de lumière n'éprouve pas, sans doute, une déviation brusque et instantanée, comme une ligne géométrique qui se brise; il est probable qu'il se courbe et s'incline par degrés avant d'arriver à sa nouvelle direction rectiligne; mais si cette courbure se forme réellement, son étendue est si petite, qu'il n'est jamais possible d'en constater l'existence. Nous représenterons donc les rayons réfractés comme de simples lignes brisées.

Un rayon incident ne donne naissance, en général, qu'à un seul rayon réfracté, cependant il existe des corps, tels que le spath d'Islande, le cristal de roche et plusieurs autres cristaux, dans lesquels un seul rayon incident donne presque toujours naissance à deux rayons réfractés; ces phénomènes de double réfraction sont liés à la *polarisation* de la lumière; nous nous contenterons d'établir les lois de la *réfraction simple* : ces lois sont exprimées dans les deux propositions suivantes :

1°. Le plan de réfraction coïncide toujours avec le plan d'incidence.

2°. Le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux.

DES PRISMES.

Définitions et phénomènes généraux que présentent les rayons qui traversent des prismes. — Un prisme en optique est un milieu diaphane ayant deux surfaces planes, polies et inclinées entre elles. Concevons, par exemple, un morceau de verre, sur lequel on ait taillé un nombre quelconque de facettes planes, le verre compris entre deux de ces faces forme un prisme; quand la lumière pénètre par l'une et sort par l'autre, on dit qu'elle traverse le prisme.

Le sommet du prisme est la ligne suivant laquelle se rencontrent les deux facettes ou suivant laquelle elles se rencontreraient si elles étaient suffisamment prolongées.

La base du prisme est une face quelconque opposée au sommet, soit qu'elle existe en réalité, soit qu'on la suppose exister.

L'angle réfringent est l'angle formé par les deux faces du prisme.

Une section principale est une section faite par un plan perpendiculaire à l'arête qui forme le sommet.

Dans la plupart des expériences, on emploie des prismes à trois faces rectangulaires AB′, AC′ et BC′ (*fig.* 52, *Pl. III*). Alors, quand la lumière traverse les faces AB′ et B′C, c'est l'arête BB′ qui est le sommet, et la face AC′ qui est la base; quand elle traverse AC′ et BC′, c'est CC′ qui est le sommet, et AB′ la base.

La section principale d'un tel prisme est toujours un triangle, et suivant que ce triangle est rectangle, isocèle, équilatéral ou scalène, on dit que le prisme est lui-même rectangle, isocèle, équilatéral ou scalène.

Phénomènes les plus généraux que présentent les prismes, soit avec la lumière ordinaire, soit avec la lumière solaire. — *Premièrement.* Un prisme étant horizontal, le sommet en haut, si l'on approche l'œil près de l'une des faces pour recevoir la lumière qui est entrée par l'autre, on observe deux phénomènes remarquables : les objets sont considérablement déviés et comme relevés vers le sommet du prisme; de plus, ils sont colorés vers leurs bords de toutes les couleurs de l'iris, du moins vers leurs bords horizontaux; car les bords verticaux ne prennent point de couleurs nouvelles. Si le sommet du prisme était en bas, les phénomènes seraient inverses. En plaçant le prisme verticalement, les phénomènes se produisent alors horizontalement de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant la position du sommet du prisme. En variant ainsi les observations, on peut constater que la déviation a lieu toujours vers le sommet du prisme perpendiculairement aux arêtes, et la coloration toujours parallèlement aux arêtes; c'est-à-dire que les objets ne sont colorés des nuances de l'iris que dans leurs bords qui se trouvent parallèles au prisme.

Secondement. Lorsqu'un trait de lumière solaire pénètre dans la chambre noire par une petite ouverture suivant la direction VD (*fig.* 53, *Pl. III*), si l'on interpose près du volet un prisme horizontal dont le sommet soit en haut, on observe de même une déviation et une coloration. Le trait est rabaissé vers la base du prisme dans la direction PR, et l'image du soleil qui était en D circulaire et blanche, paraît en R allongée perpendiculairement aux arêtes du prisme et colorée des plus vives nuances de l'iris. Elle forme ce qu'on appelle le *spectre solaire*. Quand le sommet du prisme est en bas, la déviation se fait en haut avec les mêmes apparences; si le prisme est vertical ou incliné, elle se fait alors latéralement, ou obliquement, et il est facile de vérifier par l'expérience qu'elle se fait toujours perpendiculairement aux arêtes du prisme.

LENTILLES.

Propriétés générales des lentilles. — Les lentilles sont des corps diaphanes, qui ont la propriété d'augmenter ou de diminuer la convergence naturelle des faisceaux de lumière qui les traversent.

Nous ne parlerons ici que des lentilles sphériques, c'est-à-dire celles dont les surfaces sont des plans ou des sphères, parce qu'elles sont à peu près les seules qui entrent dans la composition des divers instruments d'optique : les lentilles elliptiques, paraboliques, cylindriques, etc., présentent bien aussi des phénomènes analogues, mais elles sont plus difficiles à travailler, et jusqu'à présent on n'en a fait aucun usage important.

En combinant de toutes les manières possibles les surfaces planes et sphériques, on ne peut former que six lentilles différentes.

La première est la lentille bi-convexe; elle est formée de deux surfaces sphériques convexes dont les rayons peuvent être égaux ou inégaux.

La deuxième est la lentille plan-convexe ; elle est formée par un plan et par une surface sphérique convexe dont le rayon peut être quelconque.

La troisième est le ménisque convergent; elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre convexe ; le rayon de la première étant plus grand que le rayon de la seconde.

La quatrième est la lentille bi-concave ; elle est formée par deux surfaces sphériques concaves, dont les rayons peuvent être égaux ou inégaux.

La cinquième est la lentille plan-concave ; elle est formée par un plan concave et par une surface sphérique concave dont le rayon peut être quelconque.

La sixième, enfin, est le ménisque divergent ; elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre convexe, le rayon de la première étant plus petit que le rayon de la seconde.

L'axe d'une lentille est la ligne mathématique qui joint les deux centres de courbure de ses deux surfaces ; pour les lentilles plan-concave et plan-convexe, l'axe est la perpendiculaire abaissée du centre de courbure sur le plan.

Dans l'épaisseur d'une lentille et sur son axe se trouve un point particulier que l'on nomme le *centre optique* ; tous les rayons de lumière qui passent par ce point, prennent, en sortant de la lentille, une direction parallèle à celle qu'ils avaient en y entrant.

DE LA DISPERSION DES COULEURS.

En observant avec attention les spectres formés par des prismes de diverses substances, on reconnaît bientôt que les diverses couleurs, quoique rangées toujours dans le même ordre, n'occupent pas cependant des longueurs proportionnelles. Ainsi un prisme de flint, par exemple, donne perpétuellement moins de rouge et plus de violet qu'un prisme de crown, et il y a d'autres substances qui offrent des différences encore plus frappantes. En général, la même couleur est tantôt plus on moins resserrée, tantôt plus ou moins développée. Ce phénomène se trouve évidemment lié avec les grandeurs des indices de réfraction correspondant à chaque couleur. Si l'on prend la différence de ces indices, pour le violet et le rouge, on aura ce qu'on appelle la *dispersion* de la lumière. Une substance est d'autant plus dispersive que pour elle cette différence est plus grande. Parmi les diverses substances l'eau est celle qui a une des moindres dispersions, et le flint est celle qui en a une des plus grandes. C'est ce qu'on peut aisément montrer aux yeux en prenant un prisme d'eau et un prisme de flint dont les angles soient tels, par exemple, que les rayons rouges éprouvent à peu près la même déviation ; car on pourra voir alors qu'à la même distance le premier spectre aura beaucoup moins de longueur que le second, ce que l'on peut exprimer encore en disant que, vu du prisme, il serait vu sous un angle beaucoup plus petit.

DE L'ACHROMATISME.

On dit que des prismes sont *achromatiques* quand ils ont la propriété de dévier la lumière sans y développer de couleurs, et l'on dit

pareillement que des lentilles sont achromatiques quand elles forment en leurs foyers des images incolores des objets. On a cru pendant longtemps que l'achromatisme était impossible, c'est-à-dire que la lumière ne pouvait pas être déviée sans être décomposée. C'est Newton lui-même qui avait été conduit à cette conséquence, dont l'inexactitude ne fut constatée qu'après des années et par de longs débats entre les plus grands géomètres, tels qu'Euler, Clairaut et d'Alembert. Présentement, après tous les progrès que l'on a faits, soit en optique, soit dans l'art de travailler les verres, et avec toutes les ressources que le calcul fournit aux physiciens, la question de l'achromatisme est encore l'une des plus délicates et des plus embarrassantes, tant pour la théorie que pour la pratique; c'est pourquoi nous nous contentons d'exposer les principes sur lesquels repose la construction des prismes et des lentilles achromatiques.

BESICLES.

Les besicles sont les lunettes dont se servent les presbytes et les myopes pour avoir une vision distincte des objets à la distance moyenne de 25 à 30 centimètres.

Supposons, par exemple, qu'un presbyte ne puisse voir nettement qu'à la distance de 80 centimètres; alors il est évident que pour lui les images ne peuvent être nettes, à moins que la lumière ne pénètre dans ses yeux avec la divergence qu'elle a en venant de 80 centimètres de distance. Ainsi, pour qu'il puisse voir, comme une personne douée d'une bonne vue, les objets à 30 centimètres, il suffit de placer les objets à cette distance et de modifier par une lentille la lumière qu'ils envoient, pour qu'elle ne soit pas plus divergente que si elle venait de 80 centimètres : c'est-à-dire qu'un presbyte qui voit naturellement à 80 centimètres, doit employer immédiatement au devant de l'œil un verre convergent de 40 centimètres de distance focale principale pour voir les objets à 30 centimètres.

LOUPES OU MICROSCOPES SIMPLES.

Les verres grossissants qui ont depuis six lignes jusqu'à quelques pouces de distance focale, se nomment *loupes;* quand cette distance est moindre que six lignes, on les appelle *microscopes simples* ou *lentilles microscopiques*. Cet instrument sert à voir de petits objets ou de petits détails que l'on ne pourrait pas apercevoir à la vue simple. L'objet qu'on regarde à la loupe simple doit être placé toujours en avant, à une distance moindre que la distance focale principale; sa position varie avec la portée de la vue, mais il est facile de déterminer, dans tous les cas, le point précis où il faut le tenir. En effet, soit x la distance à laquelle il faut placer l'objet au devant d'une loupe dont la distance focale principale est F; en supposant que l'œil de l'observateur soit appliqué immédiatement contre la loupe, et que pour lui la distance de la vision distincte soit représentée par D, il faut évidemment que les faisceaux, qui partent de la distance x, possèdent, après avoir traversé la loupe, la même divergence que s'ils venaient naturellement d'une distance D; c'est-à-dire qu'après

l'émergence ils doivent faire leur foyer à une distance D. On a donc

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{F} + \frac{1}{x},$$

d'où

$$x = \frac{FD}{F - D}.$$

CHAMBRE CLAIRE.

Chambre claire de Wollaston. — Cet appareil sert à tracer une image fidèle des objets, d'un édifice, d'un paysage, etc. Il se compose essentiellement d'un prisme triangulaire ABCD (*fig.* 54, *Pl. III*) ayant en B un angle droit, et en D un angle obtus de 135 degrés. La face CB est tournée vers l'objet dont on veut prendre le dessin : RX, par exemple, étant l'axe d'un pinceau envoyé par un point de cet objet, on voit que ce rayon, après avoir pénétré perpendiculairement dans l'intérieur du prisme, par la face CB, éprouve en R une première réflexion totale sur CD, en R′ une seconde réflexion totale sur AD; et vient enfin sortir perpendiculairement à la face AB, près du sommet A du prisme. L'œil étant placé un peu au-dessus de cette face, de manière que la pupille soit en PP′, son milieu correspondant au sommet A, il est évident 1° que par la moitié antérieure de la pupille on verra, par réflexion, l'image de l'objet X sur le prolongement de ER′; et 2° que, par l'autre moitié de la pupille, on verra directement le point d'un tableau horizontal sur lequel cette image se projette. Ainsi, en tenant avec la main la pointe d'un crayon sur ce point du tableau, on pourra distinguer à la fois l'image et la pointe du crayon. Ce raisonnement s'appliquant aux points voisins du point X, il en résulte que l'on verra sur le tableau une image d'une certaine étendue, et la pointe du crayon en pourra tracer les contours les plus délicats. Tel est le principe sur lequel repose la construction de la chambre claire de Wollaston, et c'est seulement pour fixer les idées que nous avons supposé la pupille partagée en deux parties égales par la verticale du sommet A; car il est évident qu'elle peut varier de position dans de certaines limites; la seule condition importante est, qu'elle reçoive à la fois des rayons réfléchis et des rayons directs.

CHAMBRE NOIRE.

La chambre noire est destinée à produire sur un tableau l'image réelle d'un champ de vision plus ou moins étendu. Dans sa construction la plus simple, elle consiste en un seul verre convergent LL′ (*fig.* 55, *Pl. III*) placé dans l'ouverture du volet d'une chambre complétement fermée FGHV. Si du centre optique C de la lentille on décrit un cône dont l'angle ACT soit égal au champ qu'elle peut embrasser, tous les objets compris dans ce cône viendront former des images nettes, à des distances plus ou moins grandes, dans l'intérieur de la chambre noire. Il semble, par conséquent, qu'il soit impossible d'avoir à la fois l'image distincte de tout le paysage AT; mais si le tableau est concave, et s'il est une portion de sphère T′A′ d'un rayon

égal à la distance focale principale de la lentille, il suffira de l'incliner convenablement en T'A", par exemple, pour avoir une représentation fidèle de tout le champ de vision; seulement, s'il y avait des objets très-voisins, comme un arbre B, il serait impossible d'avoir en même temps son image et celle du sol sur lequel il se projette, en le regardant du point C.

Dans cet appareil les images sont renversées. Pour les redresser et les amener à portée de la vue, on place ordinairement un miroir étamé au dehors et en avant de la lentille; on obtient même par là un autre avantage : c'est qu'en faisant tourner le miroir ou en l'inclinant de diverses manières, on peut amener sur le tableau successivement tous les points de vue qui sont au devant du volet.

LUNETTE DE GALILÉE.

La lunette de Galilée n'est composée que de deux verres. L'oculaire est une lentille divergente, et le second verre est un objectif convergent. L'oculaire est placé en avant du lieu de l'image formée par l'objectif. Les rayons élémentaires qui composent chaque faisceau émané des différents points de l'objet, en traversant l'oculaire, deviennent sensiblement parallèles. Ces faisceaux se croisent, et leur prolongement représente l'image droite. Dans ces lunettes, la position de l'œil la plus favorable est très-près de l'oculaire, car à mesure qu'il s'éloigne, il perd une partie des rayons. Cette disposition est employée pour les lunettes de spectacle, parce qu'elle permet de ne leur donner qu'une très-petite longueur; rarement on y emploie des objectifs achromatiques, parce qu'étant destinés à servir le soir, les couleurs qui s'y développent n'y sont pas très-vives, d'autant plus que leur grossissement n'est jamais fort considérable.

LUNETTE ASTRONOMIQUE.

Elle se compose d'un objectif convergent BB' (*fig.* 56, *Pl. III*) et d'un oculaire RR' aussi convergent. Au foyer de l'objectif en *mm'* se forme une image réelle et renversée de l'objet, et l'oculaire est une simple loupe avec laquelle on regarde cette image; il en résulte :

1°. Que l'image reste renversée;

2°. Que la longueur de la lunette est sensiblement égale à la somme des distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire;

3°. Que l'amplification est égale à la distance focale principale de l'objectif divisée par la distance focale principale de l'oculaire.

LUNETTE TERRESTRE.

L'objectif de la lunette terrestre est le même que les précédents; mais son oculaire est disposé pour remplir surtout deux conditions : 1° pour redresser l'image renversée en *mm'* (*fig.* 57, *Pl. III*) que donne l'objectif; 2° pour diminuer autant qu'il est possible toutes les aberrations de l'instrument. C'est pourquoi on le compose de quatre verres O, P, Q, R; les deux premiers O et P sont uniquement destinés à redresser l'image, et les deux derniers forment un oculaire composé, tout à fait pareil à l'oculaire du microscope. Il est nécessaire

de disposer des diaphragmes en G et G′ pour arrêter les rayons des bords qui troubleraient inévitablement la netteté des images.

La perfection de ces instruments dépend surtout du travail de l'objectif; car si la première image est à la fois parfaitement achromatique, bien distincte et vivement éclairée, il sera facile de construire des oculaires pour la redresser et l'amplifier sans lui faire subir d'altération sensible. La distinction dépend de la pureté de la matière et surtout de la courbure des surfaces; enfin, la clarté dépend de l'ouverture de l'objectif et de sa distance focale principale.

DES PHARES.

Les phares sont des foyers lumineux placés ordinairement au sommet des tours élevées, et destinés à indiquer pendant la nuit les points remarquables des côtes, des écueils, l'embouchure des fleuves ou l'entrée des ports.

L'emploi de lumières pour guider les navigateurs pendant la nuit remonte à une haute antiquité. Le fanal élevé sur l'île de Pharos par le gnidien Sostrate, sous le règne de Ptolémée Philadelphe, l'an 470 de la fondation de Rome, passa longtemps pour une merveille. Les Romains employèrent aussi ces appareils, et l'on voyait même encore, en 1643, le phare qu'ils avaient élevé à Boulogne pour diriger les navires qui traversaient la Manche.

Les phares de France forment un système d'éclairage en grande partie terminé, et déjà le plus complet de l'Europe entière. Nos côtes se garnissent chaque soir d'une ceinture lumineuse pour indiquer aux navires leur véritable position, et leur permettre de se diriger vers les ports qu'ils doivent atteindre.

Les phares étaient autrefois éclairés par des feux de bois ou de charbon de terre que l'on entretenait soigneusement pendant toute la nuit. Le célèbre Borda remplaça cet éclairage imparfait par des lampes à réflecteurs; c'était le premier pas dans la voie des perfectionnements réalisés depuis cette époque. Les lampes à double courant d'air d'Ami-Argant, furent ensuite appliquées à l'éclairage des phares, et des miroirs paraboliques, soigneusement exécutés, furent substitués aux simples réflecteurs. Tels étaient les moyens d'éclairage employés pour les phares, lorsque M. Augustin Fresnel parvint, en 1819, à faire établir ces beaux appareils dioptriques à lentilles annulaires, que nous donnons plus loin avec détails.

Les phares de France sont partagés en quatre classes de grandeurs et de portées différentes.

Les phares de premier ordre, espacés en général de 14 lieues marines les uns des autres, servent à reconnaître les parages, et, pour les bâtiments qui viennent du large, à corriger l'*estime*.

Les phares de deuxième et de troisième ordre indiquent les écueils, les baies et les rades foraines.

Enfin, les phares de quatrième ordre signalent les passes, l'embouchure des fleuves et l'entrée des ports.

Chacun des feux distribués sur les côtes, ayant à faire connaître le lieu qu'il éclaire, doit offrir un caractère distinctif qui ne permette pas de le confondre avec d'autres. Comme les grands phares sont

ordinairement situés à 7 lieues marines au moins les uns des autres, il s'ensuit qu'avec un très-petit nombre d'espèces différentes, deux feux semblables sont toujours séparés l'un de l'autre par une distance plus grande que l'erreur dans laquelle peut être un bâtiment sur sa véritable route, ce qui ne permet aucune confusion à cet égard. Le petit nombre de moyens que nous allons indiquer suffit donc pour établir la distinction des feux.

Quelques phares sont à feu fixe et éclairent constamment tous les points de l'horizon, mais le plus grand nombre sont à éclipses. La durée relative de l'éclipse et de l'éclat varie avec la distance de l'observateur, mais le temps qui sépare une éclipse de la suivante est constant et fournit le caractère distinctif du feu.

D'autres phares, enfin, offrent un feu fixe, varié par des éclats périodiques très-brillants, ce qui fournit un troisième moyen de distinction. On a construit quelques lanternes des phares de quatrième ordre en verres de couleur, espérant obtenir ainsi un nouveau moyen de caractériser les feux; mais ces verres absorbent beaucoup de lumière, et certains états de l'atmosphère peuvent modifier singulièrement la teinte qu'ils présentent habituellement, et même faire paraître colorés des feux blancs, ce qui pourrait entraîner dans les erreurs les plus funestes.

Les côtes de France présentent, sous le rapport géologique, une symétrie remarquable : à droite et à gauche du grand massif primitif de la Bretagne, nous rencontrons d'abord les côtes escarpées et garnies de falaises calcaires, qui s'étendent depuis Barfleur, à l'extrémité du Cotentin, jusqu'à Eu, d'une part, et de l'autre, depuis les Sables-d'Olonne, à l'extrémité de la Vendée, jusqu'à l'embouchure de la Gironde.

Des côtes plates et sablonneuses succèdent aux falaises; elles s'étendent, d'un côté, depuis l'embouchure de la Gironde jusqu'à Bayonne, et de l'autre, depuis Eu jusqu'à Dunkerque, excepté à Boulogne, où reparaissent quelques falaises.

Les terrains primitifs forment des côtes dentelées et garnies d'écueils, qui s'étendent souvent à plusieurs lieues en mer, et rendent leurs abords on ne peut plus difficiles; mais ils présentent en même temps beaucoup de criques, de petits havres et de ports : ce sont les côtes les plus fréquentées et en même temps les plus dangereuses; ce sont celles qui doivent offrir le plus grand nombre de phares. Les côtes à falaises offrent en général des mouillages faciles et de grandes profondeurs d'eau jusqu'au pied des terres. Les côtes sablonneuses et unies formées par les alluvions présentent des bancs et des hauts-fonds presque aussi redoutables que les écueils des terrains primitifs, mais n'offrent presque pas de lieux de refuge : elles sont peu fréquentées, et les accidents y sont par conséquent moins à craindre.

D'après ce que nous venons de dire, on comprend que la plupart de nos phares sont placés sur les côtes de Bretagne; c'est, par conséquent, dans cette partie de la France que nous prendrons notre point de départ, en signalant seulement les phares français les plus remarquables.

Le phare des Heaux de Bréhat, construit par M. Reynaud, ingé-

nieur en chef des Ponts et Chaussées, auquel on doit tant d'autres travaux remarquables, peut être cité comme un modèle pour les édifices de ce genre.

Les besoins du service y sont admirablement conciliés avec l'élégance des formes et la convenance des proportions.

Les magasins, le logement des gardiens et la chambre de quart, sont disposés dans l'intérieur de la tour et communiquent entre eux par un escalier.

Les parages si dangereux des Sept Iles sont éclairés par les phares de Bréhat, de l'île de Bas et du cap Fréhel : les deux derniers indiquent l'entrée du golfe de Saint-Brieux, et le dernier, combiné à celui de Granville, signale Saint-Malo et l'entrée de la baie de Cancale.

La navigation, aidée entre Granville et la pointe de la Hague par un feu à éclipses de demi-minute en demi-minute, placé sur le cap Certenet, est encore tellement difficile, que les grands bâtiments passent toujours au delà d'Aurigny en se guidant sur les trois phares anglais des Casquets, qui forment une espèce de constellation facile à reconnaître.

Le phare de Barfleur, élevé il y a quelques années à la pointe du Cotentin, pour remplacer un phare peu elevé, mais d'une construction élégante, qui existe encore à côté, est un des beaux monuments des ports de la Manche. Son exécution matérielle est des plus remarquables; malheureusement la forme carrée du soubassement de la tour ne paraît pas bien justifiée, et ne produit pas un effet aussi heureux qu'on pourrait le désirer. Les magasins et les logements sont distribués dans des bâtiments rectangulaires élevés autour de l'édifice principal; l'escalier est ménagé dans l'espace annulaire compris entre les parois de la tour et la surface extérieure d'un noyau vidé élevé au centre de la colonne.

Le Havre est indiqué par les deux phares du cap de la Hève, situés seulement à 100 mètres l'un de l'autre. L'entrée du port et l'embouchure de la Seine sont d'ailleurs garnis d'une série de petits feux, qui dirigent les navires dans ces parages assez difficiles. Les phares de la Hève, construits il y a déjà longtemps, ont été restaurés dans ces derniers temps, et produisent aujourd'hui un effet assez satisfaisant. Dieppe, Saint-Valéry, Boulogne et Dunkerque, possèdent aussi des phares qui complètent de ce côté l'éclairage de nos côtes.

Revenons maintenant à notre point de départ, la pointe de la Bretagne, et citons seulement en passant les phares si remarquables de Belle-Ile-en-Mer, du Four, de Noirmoutier, des Sables, de Cordouan, à l'embouchure de la Gironde, d'Arcachon et de Bayonne.

Le phare anglais de Jersey nous a toujours frappé par son aspect pittoresque.

Quant aux côtes de la Méditerranée, formées d'anciennes alluvions dans la plus grande partie de leur étendue, elles ne présentent que des surfaces unies et régulières depuis les dernières ramifications des Pyrénées à Port-Vendres jusqu'à Marseille, où reparaissent les roches abruptes qui se prolongent jusqu'à Antibes. Elles offrent, par conséquent, un assez petit nombre de mouillages et, par suite, un système très-simple d'éclairage. Six phares principaux suffi-

sent pour signaler les points les plus importants : le premier est sur les îles d'Hières; le second, le phare du Planier, signale Marseille, notre grand port de commerce; et le troisième, élevé à l'extrémité de la Camargue, indique les bouches du Rhône, tandis que le phare placé vis-à-vis d'Aigues-Mortes, celui du mont d'Agde, et enfin celui du cap Béarn, permettent de reconnaître les points principaux du vaste golfe de Lyon.

La construction des phares exige toujours beaucoup de soin, et présente, dans quelques circonstances, les difficultés les plus sérieuses. L'élévation considérable de ces édifices rend indispensable l'emploi de matériaux choisis et appareillés avec la plus grande perfection. On peut consulter, sur la stabilité de ces monuments et sur celle des hautes cheminées, un Mémoire intéressant publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, par M. Fresnel.

L'emploi, dans la construction d'un phare, d'un échafaudage fixe, partant du sol et s'élevant à la hauteur de l'édifice, serait en général fort coûteux, à cause de la force considérable qu'il faudrait lui donner pour résister aux vents violents qui règnent sur les côtes. On emploie donc ordinairement un échafaudage volant, très-léger, qui s'élève avec la tour elle-même.

Le montage des matériaux mérite aussi, dans ce genre de construction, de fixer sérieusement l'attention. Quand le centre de la tour est évidé, on fait ordinairement monter les pierres par cette ouverture au moyen d'un treuil placé au sommet. M. Morice Larue, qui a dirigé avec un si grand talent la construction des phares de la Hague et de Barfleur, employait à ce dernier un moyen fort économique pour élever les pierres; les chevaux qui venaient apporter les pierres étaient attelés, en retournant en chercher de nouvelles, à la corde même qui élevait celles qu'ils venaient d'apporter; de sorte que tout leur temps se trouvait employé.

Quand le phare en construction ne présente pas de vide continu dans son intérieur, on dispose sur l'échafaudage une petite grue tournante et à volée mobile qui enlève les pierres et vient les déposer à la place qu'elles doivent occuper, ce qui facilite et accélère beaucoup le travail des maçons poseurs.

Les phares sont souvent établis sur des rochers isolés qui ne sont découverts que pendant les basses mers extraordinaires. Les difficultés de construction sont alors de toutes sortes. L'ingénieur obligé de veiller à la fois à la bonne exécution du travail et à la sûreté des ouvriers, a besoin d'une grande activité et d'un dévoûment sans bornes. Un travail de cette nature convenablement dirigé suffit pour assurer la réputation d'un constructeur. C'est un des postes les plus dignes d'envie.

On amène ordinairement, pendant que la mer est encore haute, les ouvriers et les matériaux nécessaires, et on s'empresse de profiter de la basse mer pour poser les premières assises : dès que le phare est élevé au-dessus des hautes mers, on doit y travailler d'une manière continue, si le temps est calme, et pousser le travail avec la plus grande activité possible, les avaries devenant d'autant moins à craindre que la maçonnerie est plus avancée.

L'emploi des pontons pour disposer les matériaux et recevoir les ouvriers présente du danger et de grandes difficultés. L'irrégularité inévitable des arrivages retarde le travail, et devient ainsi quelquefois la cause indirecte des avaries les plus graves. Nous pensons, par conséquent, que toutes les fois qu'il est possible d'établir sur le rocher où l'on doit construire un enrochement solide, formant une espèce d'île artificielle sur laquelle on peut ensuite déposer en sûreté les matériaux et les ouvriers, il convient de suivre cette marche. Les dépenses de premier établissement seront, en général, plus que compensées par la régularité du travail et les économies de transport, de bordage, etc. D'ailleurs on doit surtout s'attacher, dans les travaux à la mer, à éviter les accidents et les avaries dont un seul suffit quelquefois pour augmenter d'un tiers ou d'un quart les dépenses prévues.

Nous citerons parmi les phares construits sur des rochers isolés, le phare du Four, situé à deux lieues en mer, vis-à-vis le Croisic (Loire-Inférieure), le célèbre phare d'Edystone, élevé par Smeaton, ingénieur anglais, et le phare de la pointe de la Hague, etc. On trouvera d'ailleurs les détails les plus intéressants sur la construction des phares dans les Mémoires insérés par MM. Larue et Potel dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, 1834 et 1835.

Éclairage des phares. — Nous avons dit qu'autrefois les becs des lampes étaient placés au foyer des miroirs paraboliques en métal poli. La lumière de la lampe se trouvait ainsi réunie en un faisceau cylindrique de rayons parallèles qui se projetaient à une grande distance. On obtient les feux fixes en réunissant un nombre de miroirs assez grands pour diriger des faisceaux de lumière dans toutes les directions de l'horizon à éclairer.

Lemoyne, qui avait compris dès 1782 l'importance des éclipses comme moyen de distinguer les phares, les produisait au moyen d'écrans qui passaient périodiquement devant les lampes. Peu de temps après, un Suédois eut l'idée d'imprimer un mouvement de rotation aux miroirs eux-mêmes, de sorte que le même faisceau lumineux était constamment utilisé, en parcourant successivement les différents points de l'horizon.

Les miroirs métalliques absorbent toujours au moins la moitié de la lumière incidente; leur exécution est très-délicate, leur entretien fort difficile, et leur poids considérable : aussi sont-ils aujourd'hui complétement abandonnés. Il n'en existe plus que dans un ou deux phares, où ils seront même bientôt remplacés par les appareils lenticulaires dont nous allons expliquer la construction et le mode d'éclairage.

Occupons-nous d'abord des lampes employées dans les appareils dioptriques. Pour arriver au résultat le plus avantageux, la flamme doit présenter le plus vif éclat sous le plus petit volume possible, afin que toutes ses parties soient peu éloignées du point mathématique qui constitue le foyer des lentilles.

M. Arago et Auguste Fresnel ont obtenu ce résultat au moyen de lampes à double courant d'air et à mèches concentriques. Les *fig.* 58 et 59, *Pl. III*, indiquent la construction d'un bec à quatre mèches pour phare de premier ordre. Ce bec reçoit constamment un excès

d'huile au moyen de petites pompes analogues à celles des lampes dites *Carcel*, mises en jeu par un mouvement d'horlogerie.

Les mèches sont enveloppées d'une forte cheminée en verre (*fig*. 60, *Pl. III*) surmontée d'un tuyau en tôle que l'on peut allonger ou raccourcir pour régler le tirage et qui porte en outre une espèce de clef de poêle destinée au même objet.

Le gardien, placé dans la chambre de quart au-dessus de la lanterne, est averti par un mécanisme fort simple des dérangements qui pourraient arriver à la lampe. L'excès de l'huile amenée aux mèches retombe dans un petit vase percé d'une ouverture à peine suffisante pour lui donner issue, de sorte que ce petit vase est toujours rempli d'huile le temps que les lampes fonctionnent bien ; mais si elles se dérangent, la quantité d'huile amenée est moins considérable, le petit vase se vide peu à peu, son poids diminue, et bientôt il peut être soulevé par un contre-poids fixé à l'autre extrémité du levier qui le supporte. Ce mouvement dégage l'échappement d'une sonnette qui s'agite alors violemment pour prévenir de l'accident. Il y a toujours dans le phare une lampe préparée pour remplacer en quelques instants celle qui viendrait à se déranger. Une instruction détaillée, rédigée par les soins de l'Administration, enseigne aux agents chargés de l'entretien et de la surveillance des phares toutes les précautions à prendre pour le nettoyage des appareils, le centrage des mèches et autres détails dans lesquels nous ne pouvons entrer ici.

Occupons-nous maintenant des appareils lenticulaires qui utilisent la lumière des lampes que nous venons de décrire. On sait qu'en plaçant au foyer principal d'un verre lenticulaire un point lumineux, on produit derrière la lentille un faisceau cylindrique de rayons parallèles qui peuvent se transmettre à de grandes distances. Tel est le principe fondamental des appareils dioptriques ; mais quand on avait voulu l'appliquer, on avait rencontré des difficultés d'exécution qui paraissaient insurmontables. La fabrication de lentilles d'une assez grande dimension était presque impossible ; leur poids eût été énorme et leur épaisseur au centre tellement considérable, qu'elles auraient absorbé la plus grande partie de la lumière. Fresnel a fait disparaître toutes ces difficultés en employant des lentilles à *échelons* (*fig*. 61 et 62, *Pl. III*) composées d'un verre central de forme ordinaire entouré d'une série d'anneaux de peu d'épaisseur dont le profil est tel, qu'ils ont tous le même foyer principal. Ces différentes pièces de verre ainsi réunies produisent donc l'effet d'une lentille dont on aurait enlevé toute la matière inutile. Les lentilles de cette espèce, absorbant à peine $\frac{1}{10}$ de la lumière incidente, sont d'une exécution facile, puisqu'elles n'exigent que l'emploi de masses peu considérables que l'on peut travailler séparément, et enfin leur entretien est on ne peut plus simple. Buffon avait eu déjà l'idée de lentilles annulaires, mais il n'avait pu les exécuter. Tout l'honneur de cette invention revient à M. A. Fresnel, qui, du reste, n'avait pas connaissance des travaux de Buffon sur ce sujet.

Voyons maintenant comment l'ingénieuse idée des lentilles à échelons se prête à tous les besoins de l'éclairage des phares. Pour obtenir

les feux fixes, on forme un tambour annulaire engendré par la révolution du profil (*fig.* 62), non plus autour d'une ligne perpendiculaire à sa surface et passant par son centre, comme pour les lentilles, mais bien autour d'une droite verticale passant par le foyer principal du profil. On forme ainsi le tambour à feu fixe représenté en coupe et en plan par les *fig.* 63 et 64, *Pl. III*, avec ses zones dioptriques sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

Les feux à éclipses sont produits par la rotation d'un tambour octogonal (*fig.* 65 et 66, *Pl. III*) formé de huit grandes lentilles à échelons analogues à celle représentée *fig.* 61 et 62. Les faisceaux lumineux qui émergent de chacune de ces lentilles, parcourent successivement tous les points de l'horizon qu'ils éclairent les uns après les autres. La vitesse de rotation du tambour détermine le temps qui sépare les différents éclats. Ainsi, par exemple, quand il fait une révolution en huit minutes, on aperçoit un éclat par minute.

Les phares à feux variés par des éclats présentent une disposition un peu différente. Ils sont formés (*fig.* 67 et 68, *Pl. III*) d'un tambour circulaire à feu fixe autour duquel tourne une lentille prismatique dont la figure indique la section droite. La lumière émise par la lampe et déjà réunie en nappe circulaire par le tambour à feu fixe, se trouve de plus réunie en faisceau parallèle et produit ainsi un éclat passager plus vif que celui du feu fixe. Cet éclat est nécessairement précédé et suivi d'une petite éclipse dont la durée, comme celle de l'éclat lui-même, dépend de la vitesse de rotation de la lentille prismatique autour du tambour fixe.

Les appareils, tels que nous venons de les décrire, n'utiliseraient que la partie de la lumière de la lampe émise dans l'angle formé par les lignes partant du centre de la flamme et passant par les bords extérieurs des lentilles. Il faut encore utiliser la lumière émise dans les autres directions. On arrive à ce résultat au moyen de différents appareils. La première idée qui se présente consiste à disposer au-dessus et au-dessous du tambour dioptrique, une série de miroirs paraboliques ayant tous pour foyer la lampe elle-même. L'exécution et l'entretien de ces miroirs est difficile, et ils ne réfléchissent régulièrement, comme nous l'avons déjà dit, que la moitié de la lumière qu'ils reçoivent. On leur a donc substitué un système de lentilles à échelons inclinés sur lesquels tombe la lumière et dont elle émerge en faisceaux parallèles qui sont à leur tour renvoyés dans la direction voulue par des miroirs plans, en glaces étamées, convenablement inclinés. Cette disposition absorbe moins de lumière que la première, mais elle est compliquée, et les miroirs étamés ont l'inconvénient de s'altérer assez rapidement. On adopte par conséquent aujourd'hui une disposition plus parfaite dont le prix est malheureusement trop élevé. On place au-dessus et au-dessous du tambour principal une série d'anneaux, à section triangulaire, indiqués *fig.* 63 et 64, dont la forme est calculée de telle sorte que la lumière, en arrivant divergente à la partie inférieure, éprouve sur la face la plus inclinée une *réflexion totale*, et sort ensuite par la troisième face en faisceaux parallèles. Ces anneaux dioptriques remplissent donc à eux seuls la

double fonction des lentilles et des miroirs de l'appareil précédent; ils absorbent très-peu de lumière et ne s'altèrent pas plus que le reste de l'appareil.

Les appareils lenticulaires des phares à éclipse sont rapportés par un pivot et un système de galets. Un mouvement d'horlogerie, mû par un poids et placé au-dessous de la lanterne, leur imprime le mouvement de rotation qu'ils doivent avoir. Dans tous les cas, l'appareil d'éclairage est renfermé dans une lanterne en glaces qui couronne le phare. Le dôme de la lanterne est en cuivre et surmonté d'un paratonnerre. Les glaces sont fixées dans les nervures de montants en fer ou mieux en bronze; malgré leur épaisseur de $0^m,08$ à $0^m,10$, elles sont souvent cassées par les oiseaux de mer qui viennent se précipiter vers la lumière.

La fabrication des appareils dioptriques des phares est arrivée aujourd'hui, grâce aux efforts de MM. Soleil et Henri Lepaute, à un degré de perfection qui laisse peu de chose à désirer. L'Angleterre, la Suède, la Norwége et les États-Unis ont acheté en France, depuis quelques années, plus de quarante appareils d'éclairage pour les phares.

Les instruments pour la taille des lentilles et des anneaux sont très-simples par eux-mêmes. Ils exigent seulement une grande précision. La pièce de verre collée sur un disque horizontal en métal animé d'un mouvement de rotation, est usée et polie au moyen d'un frottoir fixé à l'extrémité d'une pièce de fer, dont l'autre bout est réuni par une charnière à un point fixe. La longueur de cette pièce de fer est égale au rayon de courbure du profil générateur de la surface que l'on exécute.

Les machines à tailler les lentilles sont mises en mouvement dans les beaux ateliers de M. Henri Lepaute, rue de Vaugirard, n° 133, à Paris, par une machine à vapeur. L'outillage puissant de ce fabricant distingué lui permet de faire mieux et à plus bas prix que qui que ce soit ce genre de travail.

Portée des Phares. — Intensité de leur lumière. — La portée des phares du premier ordre varie de 28 à 44 kilomètres; celle des feux de port de 11 à 22 kilomètres. On ne doit pas confondre cette portée théorique, dépendant de leur évolution, avec la limite de leur *visibilité*, qui peut être sensiblement diminuée par l'état de l'atmosphère, et qui, dans des circonstances favorables et pour des phares très-élevés, peut s'étendre, au contraire, beaucoup plus loin. Le phare du mont d'Agde, par exemple, a été aperçu de celui du cap Béarn, à une distance de 93 kilomètres.

On suppose, dans le calcul de la portée des phares, que l'observateur est placé sur les vergues, à 12 ou 15 mètres au-dessus du niveau de la mer, pour les feux de premier ordre; à 10 mètres pour ceux du second ordre; à 5 mètres pour ceux du troisième ordre; et enfin à 3 mètres seulement pour les phares du quatrième ordre. Cela posé, si l'on appelle R le rayon de la terre, h la hauteur du feu au-dessus des grandes mers, et d la portée, on voit facilement que ces quantités sont liées par la relation $d^2 = h\,(2R + h)$, ou, supprimant h, quantité

infiniment petite par rapport à 2 R dans le second facteur, $d^2 = 2Rh$; d'où on tirerait $h = \frac{d^2}{2R}$. Mais la réfraction atmosphérique augmente la portée dans le rapport de 84 à 100, de sorte que d étant donné, on obtient h par la formule $h = \frac{0,84\,d^2}{2R}$.

La lumière d'un bec quadruple, semblable à celui que nous avons décrit, équivaut à 17 becs de Carcel. Les grands panneaux de lentilles à échelons, de 1 mètre de hauteur et de $0^m,76$ de largeur, donnent des éclats qui dans l'axe équivalent à 400 becs de Carcel ou à 2400 bougies. Il serait matériellement impossible d'obtenir avec des miroirs de pareils résultats.

CHIMIE.

La Chimie est une science qui a pour objet la connaissance de l'action moléculaire et réciproque de tous les corps les uns sur les autres.

NOTIONS SUR LA NATURE DES CORPS ET SUR LA FORCE QUI UNIT LEURS PARTIES CONSTITUANTES.

Il existe un petit nombre de corps dont on ne peut retirer qu'une sorte de matière, on les appelle *corps simples;* il en existe, au contraire, un grand nombre dont on peut retirer plusieurs matières de nature différente, on les appelle *corps composés*. Ainsi, le fer est un corps simple ou un élément, parce que, de quelque manière qu'il soit traité, on n'en peut retirer que du fer; le marbre est un corps composé, parce qu'on peut en retirer de la chaux, du charbon et un air particulier. On dit que deux ou plusieurs corps se combinent, lorsqu'ils agissent les uns sur les autres de manière à n'en plus former qu'un seul dont toutes les parties, même les plus ténues, contiennent une certaine quantité de chacun d'entre eux. Si l'on fait fondre dans un creuset 80 parties de plomb et 20 parties de soufre, on obtient un composé dans les plus petits fragments duquel on trouve du plomb et du soufre.

Les corps sont, comme nous l'avons déjà dit en Physique, à l'état solide, à l'état liquide ou à l'état de fluide aériforme.

Force d'agrégation et de cohésion. — Tous les corps ne se combinent pas les uns avec les autres, parce que différentes causes s'y opposent; mais tous tendent à se combiner. Nous ne pouvons expliquer cette tendance générale à la combinaison, qu'en admettant l'existence d'une force inhérente aux molécules de la matière. Cette force, quelle qu'en soit la cause, a été appelée *attraction moléculaire;* elle n'a lieu qu'à distance inappréciable ou près du point de contact : en effet, si la distance qui sépare deux corps est mesurable, si l'œil peut la saisir, les molécules ne s'attireront point; mais s'ils se touchent, ou s'ils sont dans un contact apparent, elles pourront s'attirer et s'unir. Cette attraction paraît donc bien différente de l'attraction planétaire, puisque celle-ci s'exerce entre les masses et à des distances considérables, et qu'elle agit toujours en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances.

L'attraction moléculaire prend différents noms, selon qu'elle a lieu entre les molécules de même nature, auquel cas on l'appelle *cohésion;* on l'appelle *affinité,* lorsque l'attraction a lieu entre des molécules de nature différente.

De la cohésion. — La cohésion est la force qui unit les molécules de même nature ; elle est en proportion directe avec l'effort nécessaire pour désunir ces molécules. La cohésion qui existe entre les particules respectives de deux corps que l'on veut combiner est toujours un obstacle à leur combinaison : si donc cette cohésion est plus grande que leur affinité, la combinaison ne pourra avoir lieu, ce qui explique pourquoi les corps solides ne se combinent pas ensemble. En effet, prenons le plomb et le soufre, et supposons que la cohésion qui unit les particules de soufre soit égale à 8, ainsi que celle qui unit les particules de plomb, et que l'affinité des particules du soufre pour celles du plomb ne soit égale qu'à 6 ; il est évident que dans ce cas la combinaison n'aura pas lieu, puisque la cohésion des deux corps qui doivent s'unir l'emporte sur leur affinité. Mais si l'on fond ces deux corps, ils se combinent à l'instant, parce qu'alors leur cohésion devient pour ainsi dire nulle, tandis que leur affinité réciproque est encore forte, ce qui prouve que la première de ces forces décroît dans un rapport plus grand que la seconde.

Cristallisation. — Précipité. — Lorsque par un moyen quelconque on diminue la cohésion d'un corps solide, pour le rendre liquide ou gazeux, et qu'ensuite on fait disparaître la cause de ce changement ; alors le corps revient à son premier état, et ses molécules se disposent de telle manière qu'elles donnent naissance à un solide régulier nommé *cristal*. Toutes les fois donc qu'un corps passera de l'état liquide ou de l'état gazeux à l'état solide, il *cristallisera*. Si ce passage était trop rapide, la cristallisation serait confuse, et les formes du solide ne seraient pas régulières. Alors ce composé apparaît sous forme de poudre ou de flocons, et se dépose ou se précipite au fond du vase dans lequel on opère ; de là l'expression de *précipité* que nous emploierons pour désigner un corps solide séparé tout d'un coup d'un liquide.

Les agents que l'on emploie pour faire cristalliser les corps sont l'eau, le feu et quelquefois l'esprit-de-vin. Les corps peuvent prendre par la cristallisation des formes très-variées ; les cristaux sont formés de lames superposées qu'il est difficile de séparer les unes des autres mécaniquement. On appelle *forme primitive* celle que les cristaux peuvent prendre par la division mécanique et qui est toujours la même pour les cristaux de même nature ; et l'on appelle *forme secondaire* celle qui est propre à chacun de ces cristaux, et qui diffère de la forme primitive : ainsi, la forme primitive de la chaux carbonatée est un rhomboïde, et ses formes secondaires sont le prisme hexaèdre régulier ; la forme primitive de la chaux fluatée est un octaèdre, et sa forme secondaire un cube. Les formes primitives qu'on a reconnues jusqu'à présent, sont en général au nombre de six ; savoir : le tétraèdre régulier ; le prisme hexaèdre régulier ; le parallélipipède, qui est tantôt rhomboïdal, tantôt cubique, etc. ; l'octaèdre, dont la surface est composée de triangles qui sont, suivant les espèces, équilatéraux, ou isocèles, ou scalènes ; le dodécaèdre à rhombes égaux et semblables ; et le dodécaèdre, composé de deux pyramides droites hexaèdres, réunies par leurs bases.

De l'affinité. — L'affinité ou la force qui tend à unir les molécules

de nature différente, varie entre les différents corps. Cette force est modifiée dans ses résultats : 1° par la quantitité relative des corps entre lesquels la combinaison peut avoir lieu; 2° par les combinaisons dans lesquelles les corps peuvent être engagés; 3° par la cohésion; 4° par le calorique; 5° par l'état électrique des corps; 6° par la pesanteur spécifique; 7° enfin par la pression.

De l'analyse et de la synthèse. — Si l'on met en contact un corps C avec un composé de deux autres corps A et B, ou l'action sera nulle, ce qui arrivera presque toujours si les corps sont solides; ou l'action s'effectuera, ce qui aura presque toujours lieu si les corps sont liquides, et alors le corps C se combinera avec les corps A et B, et formera un composé ternaire, ou s'emparera de l'un d'eux et isolera l'autre. En effet, supposons que C ait pour A plus d'affinité que pour B, et plus que n'en ont l'un pour l'autre A et B; supposons d'ailleurs que B n'en ait que très-peu pour A et C, et qu'il soit de nature à être par lui-même solide ou gazeux : il arrivera alors que les molécules de B tendront plus à se rapprocher ou à s'éloigner les unes des autres qu'à se combiner avec A et C; c'est-à-dire que la cohésion ou la force expansive des molécules de B sera plus grande que leur affinité pour A et C; en conséquence, elles se réuniront et donneront lieu à un précipité, ou s'écarteront et donneront lieu à un fluide élastique : de là les moyens que les chimistes emploient pour séparer les principes constituants des corps et en déterminer la proportion. Un composé AB étant donné, ils le mettent en contact avec un corps C, qui s'empare de A et isole B comme nous venons de le dire; ensuite ils mettent A et C en contact avec un autre corps D qui s'empare de C et isole A : ils obtiennent ainsi à part les corps A et B et les pèsent, de sorte qu'ils savent pour combien ces corps entrent l'un et l'autre dans le composé AB. Cette opération se nomme *analyse*, tandis qu'on donne le nom de *synthèse* à celle qui est tout à fait inverse, et qui consiste à combiner les éléments des corps. L'analyse est donc l'art de décomposer les corps, et la synthèse l'art de les recomposer.

Loi suivant laquelle les corps se combinent. — Lorsque les corps n'ont qu'une faible affinité réciproque, ils peuvent se combiner en toutes proportions, du moins entre les limites où leur combinaison est possible : tels sont l'eau et le sel, l'eau et l'esprit-de-vin, ou tout autre corps soluble dans l'eau. Mais lorsqu'au contraire leur affinité est très-grande, ils ne se combinent tout au plus qu'en un petit nombre de proportions, et de là résultent les nouveaux corps soumis dans leur composition à des lois remarquables par leur généralité, et surtout par la simplicité des rapports qu'elles établissent entre les quantités respectives des principes des composés. Les substances gazeuses se combinent en volume dans des rapports simples, et de telle manière que leur construction apparente est aussi en rapport simple avec leur volume primitif. Par exemple, en volumes :

	S'UNISSENT AVEC	ET FORMENT
200 de gaz hydrogène....	100 de gaz oxygène....	de l'eau.
300 de gaz hydrogène....	100 de gaz azote......	200 de gaz ammoniac.
100 de gaz hydrogène....	100 de chlore.........	200 de gaz hydrochlore.

Les combinaisons de l'azote et l'oxygène peuvent très-bien faire comprendre cette loi. Ces combinaisons sont au nombre de cinq. Toutes contiennent 100 d'azote; mais le principe qui y entre pour plusieurs proportions y entre de telle manière, que les quantités les plus fortes sont des multiples des plus faibles. En effet, la première contient 100 d'azote et 50 d'oxygène; la deuxième, pour la même quantité d'azote, contient 100 d'oxygène; la troisième, 150; la quatrième, 200; la cinquième, 250 : d'où l'on peut voir que les rapports sont entre eux comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc., que chaque nombre est un multiple par un nombre entier du plus faible. Si la loi était fausse, l'analyse aurait démontré par d'autres composés, des combinaisons dans lesquelles ce ne seraient plus 100 d'un corps et 50 d'un autre, qui seraient entrés en combinaison, mais bien 100 de l'un et 44, ou 45, ou 46, ou 48, etc., de l'autre; or c'est ce qui n'est pas.

Equivalents. — Si l'on vient à comparer plusieurs séries de combinaisons ayant toutes le même radical, et une composition correspondante, on arrive à ce résultat très-remarquable : que pour la même quantité en poids du radical, les quantités pondérables de l'autre corps sont extrêmement variables. Ces quantités, comparées toutes à un nombre connu, celui de l'oxygène, portent le nom d'*équivalents* ou proportions chimiques. Par exemple, si l'on considère 100 d'oxygène en poids comme un équivalent, il est évident que 442,65 de chlore en poids seront aussi un équivalent, puisque cette quantité équivaut à 100 d'oxygène.

En général, on forme les nombres proportionnels en prenant un poids de corps simple tel, qu'il exige 100 parties d'oxygène pour passer au premier degré d'oxydation.

Le nombre proportionnel des corps simples une fois déterminé, il n'est pas difficile de faire celui des corps composés. Si l'on veut former l'équivalent de l'acide sulfurique, on sait que cet acide est composé de 1 proportion du soufre = 201,165 et de 3 parties d'oxygène = 300. Une simple addition nous conduit au chiffre 501,165, nombre qui représente l'équivalent de l'acide sulfurique.

NOMENCLATURE CHIMIQUE.

La nomenclature chimique sert à désigner les noms des différents corps connus jusqu'ici, et l'ordre suivant lequel nous les étudierons. Les corps sont simples ou composés; des noms insignifiants peuvent être donnés aux corps simples : ce sont même les meilleurs lorsqu'ils sont courts et qu'ils se prêtent à la formation d'autres noms; mais il est très-important que les corps composés en aient qui rappellent leurs principes constituants. Les corps simples connus sont au nombre de soixante et un, savoir :

Oxygène, fluor, chlore, brome, iode, azote, soufre, sélénium, phosphore, arsenic, molybdène, vanadium, chrome, tungstène, carbone, bore, silicium, colombium ou tantale, niobium, pelopium, titane, antimoine, tellure, or, hydrogène, osmium, ruthénium, iridium, rhodium, platine, palladium, mercure, argent, cuivre, uranium, bismuth, étain, plomb, magnésium, cérium, lantane, didimium,

cobalt, nickel, fer, cadmium, zinc, manganèse, zirconium, thorinium, aluminium, yttrium, terbium, erbium, glucynium, calcium, strontium, barium, lithium, sodium, potassium.

Le nombre des corps composés est très-considérable, et doit même sembler infini, puisqu'une différence dans la proportion des éléments suffit pour en apporter une très-grande dans les propriétés.

On peut diviser les corps simples en deux grandes séries : la première comprend l'oxygène, l'hydrogène, le carbone, le bore, le silicium, le phosphore, le soufre, le sélénium, le chlore, le brome, l'iode, le fluor, l'azote. Le caractère distinctif de ces corps est de mal conduire la chaleur ou l'électricité : on les désigne sous le nom de *métalloïdes*. Tous les autres, au contraire, conduisent bien la chaleur et l'électricité : on les appelle *métaux*.

Généralement les métalloïdes s'unissent bien aux métaux ; ils sont électro-négatifs par rapport à ces derniers.

Quand deux corps simples sont combinés, ils possèdent des propriétés particulières : tantôt ils ont une saveur aigre et rougissent la teinture de tournesol, auquel cas on leur donne le nom d'*acides;* tantôt leur saveur est âcre, urineuse et alcaline, ils verdissent le sirop de violette : on les nomme alors *alcalis* ou *oxydes*, et plus généralement *bases*.

Acides. — Quand l'acide est formé d'oxygène et d'un corps simple qui prend alors le nom de *radical*, on le nomme *oxacide* pour le distinguer d'un autre groupe d'acides formés d'hydrogène et d'un autre corps simple auxquels on donne le nom d'*hydracides*. Pour former le nom d'un acide, on énonce d'abord le nom collectif *acide* que l'on fait suivre du nom du corps simple avec la terminaison en *ique*. Nous citerons pour exemple l'*acide carbonique*, qui est le seul acide que produise l'oxygène en s'unissant au carbone. Si, au contraire, le corps simple peut se combiner en plusieurs proportions avec l'oxygène et former deux acides, le plus oxygéné se désigne avec la terminaison en *ique*, comme le précédent, et le moins oxygéné par la terminaison *eux*. Si donc il existait un acide de carbone moins oxygéné que l'acide carbonique, son nom serait *acide carboneux*. De même le mot *acide sulfurique* indique par sa terminaison qu'il n'y a pas de degré d'oxydation plus élevé, et celui d'*acide sulfureux* que c'est un degré inférieur d'oxydation.

Souvent le même corps donne naissance à trois ou quatre acides ; mais alors, au moyen de la préposition *hypo*, on désigne des degrés inférieurs d'oxydation. Ainsi l'on dit acide *hypo-sulfurique* pour indiquer la combinaison moins oxygénée que l'acide sulfurique, et acide *hypo-sulfureux* pour celle qui contient moins d'oxygène que l'acide sulfureux.

Quand au contraire le radical ne contient qu'un seul acide, celui-ci est en *ique : acide borique*.

Oxydes. — Lorsque les corps, en se combinant avec l'oxygène, ne forment pas d'acides, on donne à ces composés le nom d'*oxydes*. Ainsi l'oxyde composé d'oxygène et de carbone porte le nom d'*oxyde de carbone;* mais si le radical peut se combiner en plusieurs proportions avec l'oxygène et former plusieurs oxydes, par exemple trois,

le premier ou le moins oxygéné s'appelle *protoxyde*, le second *deutoxyde*, et le troisième *tritoxyde;* le plus oxygéné s'appelle encore *peroxyde :* de là, pour exprimer les trois oxydes de plomb, les expressions de *protoxyde de plomb*, *deutoxyde de plomb*, *tritoxyde* ou *peroxyde de plomb*.

Un acide peut résulter de la combinaison de deux corps autres que l'oxygène : alors on combine les noms des deux substances en terminant celui de la dernière en *ique* et on l'ajoute au mot *acide*. Exemple : *acide chlorhydrique*, *iodhydrique*, *fluoborique*, etc.

Quand deux corps en se combinant ne produisent ni oxydes ni acides, les noms des deux corps entrent dans la composition du nom du composé ; mais le premier nom énoncé est terminé en *ure*. Exemple : *sulfure d'arsenic*. Si les corps donnent lieu à plusieurs degrés de combinaison, on fait précéder le premier nom des mots *proto*, *deuto* ou *bi*. Exemple : *protochlorure de mercure*, *deuto* ou *bichlorure de mercure*.

Si la combinaison se fait entre deux métaux ou plus, on leur donne en général le nom d'*alliage*.

Si la combinaison se fait entre deux ou plusieurs métaux, on leur donne le nom général d'*alliage* que l'on fait suivre des noms des métaux, et l'on donne celui d'*amalgame* aux alliages dont le mercure fait partie, en ayant soin de ne désigner que les métaux autres que le mercure. Exemple : *amalgame de potassium*.

Sels. — Un acide et un oxyde en se combinant donnent naissance à un corps composé auquel on donne le nom général de *sel*. Cette dénomination ne reste pas seulement à la combinaison d'un oxyde avec un acide, mais elle s'applique encore aux combinaisons d'un acide avec l'ammoniaque ou avec des alcalis végétaux. Tous ces corps, en raison de leur propriété, celle de s'unir aux acides, pour former des sels, portent le nom de *base salifiable*.

La nomenclature des sels est très-simple : on énonce d'abord l'acide dont la terminaison est changée en *ate* pour tous les acides à terminaison en *ique*, et en *ite* pour tous ceux à terminaison en *eux*, en le faisant suivre du nom du métal ou de l'oxyde. Exemple : *sulfate de fer*, *sulfite de chaux*. L'oxyde peut être au premier, au deuxième degré d'oxydation ; alors on met devant le nom du métal les mots protoxyde, deutoxyde, etc. Exemple : *sulfate de protoxyde de fer*, *carbonate de deutoxyde de cuivre*.

Quand la combinaison est faite dans les proportions où les propriétés antagonistes des deux corps disparaissent le plus, on dit que le sel est neutre ; s'il y a excès d'acide, on le dit *sur-sel;* si, au contraire, c'est la base qui prédomine, on le dit *basique*. Exemple : *phosphate neutre*, *bi* ou *sur-phosphate*, et *phosphate basique de chaux*.

Les proportions d'acides qui s'unissent à une base, ou réciproquement, sont entre elles comme les nombres 1, 1 $\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, etc. On exprime ces rapports avec exactitude de la manière suivante :

Pour les sur-sels, la quantité étant supposée égale à 1 dans le sel neutre, on remplacera la proportion *sur* par les mots *sesqui*, *bi*, *tri*, *quadri*, etc., suivant que les proportions correspondront à 1 $\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, et ces mots précéderont le nom générique ; pour les sous-sels, ils

précéderont, au contraire, le nom spécifique. Ainsi *bisulfate de potasse* s'applique à la combinaison d'acide sulfurique et de potasse, dans laquelle il y a deux fois autant d'acide que dans le sel neutre; *acétate triplombique* s'applique à la combinaison d'acide acétique et d'oxyde de plomb, dans laquelle il y a trois fois autant d'oxyde plombique ou de base que dans le sel neutre.

Classification des corps. — Nous suivrons la classification adoptée par M. Thenard, qui, reconnaissant le rôle que joue l'oxygène dans presque toutes les combinaisons chimiques, a disposé les corps d'après le degré d'affinité qu'ils ont pour l'oxygène.

MÉTALLOÏDES.

Oxygène. — L'oxygène est un gaz sans couleur, sans odeur et sans saveur; sa pesanteur spécifique est de 1,1025, celle de l'air étant prise pour l'unité. Soumis à une pression forte et subite, il s'échauffe et devient lumineux, effet qui, selon M. Thenard, est dû à la combustion partielle de l'huile dont le piston est enduit. C'est, de tous les gaz, celui qui réfracte le moins la lumière, puisque sa puissance réfractive n'est que de 0,861616 comparée à celle de l'air. Il est de tous les corps le plus électro-négatif.

L'oxygène se combine avec tous les corps simples, tantôt avec dégagement de calorique, et tantôt avec dégagement de calorique et de lumière tout à la fois.

Ses usages. — Pour se faire une idée de ses usages, il suffit de dire qu'il fait partie de l'air atmosphérique; qu'il est le seul gaz qui puisse entretenir la vie; qu'il fait partie de tous les oxydes et de beaucoup d'acides; qu'enfin c'est lui qui joue le rôle le plus important dans ce phénomène qu'on nomme *combustion*.

Combustion. — La combustion est un phénomène dans lequel l'oxygène se combine avec un corps quelconque. Comme tous les corps simples peuvent se combiner avec l'oxygène, il s'ensuit qu'ils peuvent tous produire la combustion, ou qu'ils sont tous combustibles. La combustion a toujours lieu avec dégagement de calorique et quelquefois avec dégagement de lumière; jamais elle n'a lieu avec dégagement de lumière sans dégagement de calorique.

Flamme. — Lorsque le dégagement de calorique et de lumière se développe dans une substance gazeuse, alors il se produit ce qu'on appelle *flamme*. La flamme n'est donc qu'une matière gazeuse chauffée au point d'être lumineuse; sa température surpasse la chaleur blanche des corps solides. On le démontre en faisant voir que l'air sans être lumineux peut communiquer ce degré de chaleur. En effet, prenons un fil fin de platine, tenons-le à un vingtième de pouce environ de la flamme d'une lampe à esprit-de-vin, avec l'attention de cacher cette flamme par un corps opaque, le fil deviendra blanc par l'effet de la chaleur, quoiqu'il soit dans un lieu où il n'y a pas de lumière visible. Lavoisier explique le phénomène de l'ignition en admettant que le gaz oxygène, en se combinant au corps combustible, perd son calorique latent, et que de là résulte le dégagement de chaleur et de lumière. En effet, la chaleur spécifique de 100 parties d'eau peut être représentée par 100; la chaleur spécifique de l'eau étant prise pour

unité, celle de l'oxygène est de 0,361, et celle du gaz hydrogène de 3,2936. Il y a dans 100 parties d'eau 11,1 d'hydrogène, dont la chaleur spécifique égale 36,55 et 88,9 d'oxygène, dont la chaleur spécifique est de 20,99. En ajoutant ces deux nombres, on a 57,54 pour la chaleur spécifique du mélange des deux gaz nécessaires à la production de 100 parties d'eau; mais la chaleur spécifique de cette eau liquide est 100, c'est-à-dire 42,46 de plus que celle de ses deux éléments. L'énorme quantité de calorique dégagé pendant la combustion du gaz hydrogène ne provient donc pas d'un changement de chaleur spécifique, car il devrait y avoir un refroidissement; elle n'est point due non plus au dégagement du calorique qui donne la forme gazeuse à l'oxygène et à l'hydrogène, puisque l'eau, au moment où elle est formée, produit une vapeur beaucoup plus dilatée que ses éléments gazeux. Il faut donc chercher ailleurs la cause du dégagement du calorique.

Avant la découverte de la pile voltaïque, on avait soupçonné de l'analogie entre les forces chimiques et électriques. On n'a pas tardé à reconnaître 1° que, toutes les fois que deux électricités de nom contraire s'unissent, il y a dégagement de calorique et de lumière; 2° que, toutes les fois que deux corps se combinent, il y a aussi dégagement de calorique et de lumière : de sorte que l'on a été frappé de cette analogie de propriété. Enfin on observe que, sous l'influence de deux sources d'électricité de nom contraire, tous les corps composés se trouvent ramenés à leurs éléments; c'est alors qu'on ne peut s'empêcher d'admettre l'identité des forces chimiques et électriques. D'après cela, la combustion et les phénomènes qui en dépendent peuvent être expliqués ainsi : *Dans toute combinaison chimique, il y a neutralisation des électricités opposées; cette neutralisation produit le feu, de la même manière qu'elle le produit dans la décharge de la bouteille de Leyde, de la pile et du tonnerre.*

Hydrogène. — L'hydrogène pur est toujours à l'état gazeux, sans couleur, sans odeur et sans saveur. Sa pesanteur spécifique est beaucoup moindre que celle de l'air et de tous les autres fluides élastiques; elle n'est que de 0,0688 : de là les ballons aérostatiques, à l'aide desquels on s'élève dans l'atmosphère. Quoique le gaz hydrogène soit inflammable, il éteint les corps en combustion; mais comme ce gaz est plus léger que l'air, on ne s'assure facilement de cette propriété qu'autant que l'on tient l'éprouvette qui le renferme dans la même position que les précédentes, et qu'on y plonge une bougie allumée. Cette bougie, après avoir mis le feu aux premières couches de gaz, à cause du contact de l'air, s'éteint et ne se rallume que lorsqu'on la retire. Il résulte de ces propriétés qu'il doit s'unir facilement avec l'oxygène; en effet, à chaud, ou au moyen d'une étincelle électrique, ces deux gaz se combinent pour donner naissance à de l'eau. Cette combinaison se fait entre 2 volumes d'hydrogène et 1 d'oxygène, ou en poids 11,10 du premier et 88,90 du second. La combinaison par l'étincelle électrique s'opère avec dégagement de calorique et de lumière, en même temps qu'une détonation plus ou moins vive a lieu.

L'hydrogène est peut-être le corps qui, en brûlant, produit la

plus forte chaleur; aussi se sert-on souvent de sa combustion pour fondre des substances regardées comme infusibles.

Ses usages. — On ne s'en sert guère que pour faire l'analyse de l'air, obtenir une haute température et remplir des ballons aérostatiques.

Azote. — L'azote forme environ les $\frac{4}{5}$ du volume de l'atmosphère, il entre dans la composition de plusieurs matières végétales et de la plupart des matières animales; il est un des éléments des nitrates de potasse, de chaux, de magnésie, qui existent dans tous les lieux humides et habités par les animaux. Lavoisier ayant soumis l'air à l'analyse, le trouva principalement formé d'oxygène et d'azote. Ce résultat des plus remarquables a jeté une vive lumière sur la cause encore inconnue d'une foule de phénomènes, et a exercé une influence prodigieuse sur les progrès de la chimie.

L'azote pur est toujours gazeux, sans couleur, sans odeur, sans saveur; il éteint les corps en combustion, sa pesanteur spécifique est de 0,9757; la chaleur le dilate, le froid le condense, mais sans le faire changer d'état. Le gaz oxygène et le gaz azote n'éprouvent point de contraction par leur contact; ils ne peuvent tout au plus que se mêler. Leur mélange a lieu en toutes proportions : l'un de ces mélanges, fait avec 79 parties de gaz azote et 21 de gaz oxygène, plus un peu de vapeur d'eau et de gaz acide carbonique, constitue l'air atmosphérique. C'est de l'air qu'on extrait le gaz azote : à cet effet, on met 2 à 3 grammes de phosphore dans un têt placé à la surface de l'eau; on l'enflamme et l'on recouvre ce têt d'une grande cloche de verre pleine d'air. Une combustion vive a lieu ; il se produit des vapeurs très-épaisses d'acide phosphorique qui ne tardent point à se dissoudre; l'eau remonte et le phosphore s'éteint; ce qui reste contient encore un peu d'oxygène; on parvient à l'absorber en plaçant dans une cloche quelques cylindres de phosphore adaptés à l'extrémité de tubes creux de verre, et en les y laissant jusqu'à ce qu'ils ne répandent plus de vapeurs. Mais si le phosphore absorbe l'oxygène de l'air, il n'absorbe pas l'acide carbonique; de là la nécessité de faire passer tout le gaz de la cloche dans des flacons pleins d'eau, d'y introduire un peu de potasse solide, de les boucher et de les agiter pendant quelques minutes. La potasse se dissout et s'empare tout à coup de l'acide carbonique; elle a même l'avantage de s'emparer aussi d'une petite quantité de vapeur de phosphore que pourrait retenir le gaz azote; de sorte que l'on est bien certain qu'après toutes ces opérations celui-ci reste parfaitement pur.

Ses usages. — L'azote est employé dans les laboratoires, mais quelquefois seulement pour faire agir des corps les uns sur les autres, sans le contact de l'air. Ses fonctions dans la nature sont, au contraire, des plus importantes, puisque les matières animales et végétales ne diffèrent entre elles qu'en ce que les premières contiennent de l'azote et les secondes n'en contiennent pas, et que, par conséquent, si un animal ne recevait pas d'azote, il finirait par s'épuiser et périr.

Air atmosphérique. — Supposons qu'il n'y ait ni force attractive ni force répulsive, que tous les éléments du globe soient mêlés, et que dans cet état de choses l'attraction et le calorique soient créés; tout

à coup les divers éléments agiront les uns sur les autres et tendront à se combiner. Trois sortes de corps prendront naissance : les uns seront solides, les autres liquides et les autres gazeux. Les solides occuperont le centre du globe, les liquides en occuperont la surface et en rempliront les fissures, ceux qui seront gazeux formeront autour des précedents une couche plus ou moins épaisse; cette couche ne sera que ce que nous désignons sous le nom d'*atmosphère*, et le fluide qui la composera sera le fluide ou air atmosphérique. D'après cela, l'air atmosphérique doit donc contenir tous les corps qui ont la propriété d'être à l'état de gaz à la température ordinaire, excepté ceux qui peuvent être rendus solides ou liquides en entrant dans quelques combinaisons.

L'air atmosphérique est transparent, invisible, sans odeur, sans saveur, pesant, compressible et parfaitement élastique. Il forme autour de la terre une couche dont la hauteur paraît être d'environ 15 à 16 lieues.

Ses usages. — Il n'est point de corps dont les usages soient plus importants et plus multipliés que ceux de l'air. Nous extrayons de l'air, par la combustion des bois, des charbons, des huiles, etc., toute la chaleur et la lumière artificielle dont nous avons besoin. C'est au moyen de l'air que l'on calcine les métaux, que l'on grille les mines et que l'on en dégage le soufre et l'arsenic : le soufre à l'état d'acide sulfureux, et l'arsenic à l'état de deutoxyde. C'est de l'air que provient tout l'oxygène qui entre dans la composition de l'acide sulfurique. Tous les animaux le respirent sans cesse : sans air, aucun d'eux ne pourrait vivre. Il n'est pas moins nécessaire aux végétaux; ceux-ci décomposent surtout l'acide carbonique qu'il contient; ils s'approprient le carbone de cet acide et en rejettent l'oxygène. Comme l'air n'est presque jamais saturé d'eau, on l'emploie souvent pour dessécher une foule de corps, et même pour concentrer des liquides. C'est ainsi qu'en exposant dans les marais salants l'eau de la mer au contact de l'air, on la concentre au point que le sel s'en sépare spontanément. Enfin on se sert aussi de l'air comme force motrice.

Soufre. — Le soufre est solide, jaune-citron, très-friable, insipide. Quoique sans odeur, il en prend une légère par le frottement. Un petit choc suffit pour le briser. Lorsqu'on le serre dans la main, ou qu'on l'échauffe un peu, il craque et souvent se rompt; sa cassure est luisante, et sa pesanteur spécifique est de 1,99.

Le soufre est un très-mauvais conducteur du fluide électrique : c'est l'un des corps à la surface desquels le frottement développe l'électricité résineuse. Il est doué d'un pouvoir réfringent considérable. Sa fusion a eu lieu de 107 à 109 degrés. Si, lorsqu'il est fondu, on le laisse refroidir, toutes les portions extérieures se solidifient d'abord; si alors, perçant la croûte supérieure, on décante les parties intérieures qui sont encore liquides, le creuset qui le contient se trouve tapissé d'une foule de cristaux aiguillés et jaunes, dont la forme est très-difficile à déterminer.

Le soufre s'extrait ou des terres avec lesquelles il se trouve mêlé aux environs des volcans, ou des composés qu'il forme avec le fer et le cuivre.

Ses usages. — Les bas prix du soufre et la propriété qu'il a de brûler facilement, font qu'on en imprègne l'extrémité des allumettes pour les rendre plus inflammables et se procurer facilement de la lumière.

C'est en faisant brûler le soufre, et en exposant la soie et la laine à l'action de l'acide sulfureux qui se produit, qu'on parvient à blanchir parfaitement ces substances. Mêlé au nitre et au charbon, il constitue la poudre à canon. Combiné et sublimé avec le mercure, il forme le cinabre. Chauffé avec le cuivre dans un four à réverbère, il en résulte une masse qui fournit aux arts une partie du sulfate de cuivre qu'ils consomment. En le fondant dans un creuset avec la potasse, on obtient le *foie de soufre*. Quelquefois il est employé pour sceller le fer dans la pierre; il l'est surtout dans la fabrication de l'acide sulfurique du commerce.

Enfin, la médecine s'en sert à l'extérieur contre les maladies de la peau, et à l'intérieur spécialement contre les maladies chroniques du poumon et des viscères abdominaux. Extérieurement, on l'applique mêlé aux corps gras, tels que le cérat, la graisse de porc : intérieurement, on le donne principalement sous forme de pastilles, quelquefois jusqu'à un gros par jour.

Sélénium. — Le sélénium à la température ordinaire est solide, sans saveur, sans odeur, très-fragile, cassant comme le verre et facile à pulvériser. Il n'a que très-peu de tendance à cristalliser. C'est un mauvais conducteur du calorique et du fluide électrique. Il ne s'électrise pas comme le soufre par le frottement. Sa pesanteur spécifique est entre 4,30 et 4,32; fondu et refroidi rapidement, il se prend en une masse opaque, dont la surface est polie et d'un brun très-obscur, et dont la cassure a la couleur de plomb, et en même temps l'aspect vitreux et métallique. Lorsque, au contraire, après l'avoir fondu, on le laisse refroidir bien lentement, sa surface devient raboteuse, grenue; elle a toujours l'aspect du plomb, mais elle n'a plus de poli. Dans tous les cas, réduit en poudre, il est d'un rouge foncé. Exposé à l'action du feu, il ne tarde point à se ramollir : à 100 degrés, il est demi-liquide; à quelques degrés au-dessus, sa fusion est complète.

Chlore. — Le chlore est un gaz jaune-verdâtre, dont la saveur et l'odeur sont désagréables, fortes et tellement caractérisées, qu'elles permettent de le reconnaître toujours avec facilité. Sa pesanteur spécifique est de 2,4216. La flamme des bougies qu'on plonge dans ce gaz pâlit d'abord, rougit, et ensuite disparaît. Le chlore bien sec n'a encore pu être liquéfié, ni, à plus forte raison, solidifié par un abaissement de température; il résiste à un froid de 50 degrés : il faut qu'il soit humide pour se congeler; alors sa congélation a même lieu au-dessus de zéro. Soumis à une excessive chaleur, il n'éprouve aucune altération. Dissous dans l'eau et placé dans le courant du fluide de la pile voltaïque, il se rend, avec l'oxygène de l'eau décomposée, au pôle positif, tandis que l'hydrogène de celle-ci se rend au pôle négatif. Gazeux, il n'a d'action à aucune température sur l'oxygène lui-même à l'état de gaz; mais il en est tout autrement quand l'un d'eux est sous forme de gaz naissant : aussi existe-t-il deux oxydes et deux acides qui ont le chlore pour radical.

Le chlore existe dans la nature en très-grande quantité, mais toujours uni à d'autres corps. Les composés dont il fait partie sont les chlorures de sodium, de cuivre, d'argent, et les hydrochlorates de soude, de potasse, de chaux, de magnésie et d'ammoniaque.

Le chlore ne se combine avec l'oxygène qu'autant que l'un des deux se trouve à l'état naissant : on connaît plusieurs combinaisons de chlore et d'oxygène.

De toutes les propriétés du chlore, la plus remarquable est celle qu'il présente dans son contact avec l'hydrogène. En effet, ces gaz s'unissent en volumes égaux pour donner naissance à du gaz chlorhydrique. Mais cette combinaison est accompagnée de phénomènes particuliers : 1° Si l'on place un mélange à volumes égaux de chlore et d'hydrogène dans un lieu obscur, quel que soit le temps qu'on emploie, la combinaison n'a pas lieu; 2° si le pareil mélange est placé dans une lumière diffuse, la combinaison se fait, mais lentement encore, et on est obligé, pour la terminer, d'exposer le mélange à l'action des rayons solaires; 3° si l'on expose le mélange immédiatement à la lumière solaire, la combinaison se fait instantanément avec rupture du flacon qui contenait le mélange; le feu agit de la même manière.

L'eau à la température ordinaire dissout une fois et demie son volume de chlore, et la dissolution possède les mêmes propriétés que le chlore. En l'exposant à une température de 2 à 3 degrés au-dessous de zéro, il s'y produit une foule de cristaux lamelleux, jaune foncé, formés d'eau et de chlore.

Ses usages. — Le chlore, dissous dans l'eau, sert à blanchir les toiles de coton, de lin et de chanvre, les estampes, la pâte du papier; on l'emploie également pour enlever les taches d'encre, etc., pour désinfecter l'air corrompu par des miasmes de nature végétale ou animale.

Iode. — L'iode est solide à la température ordinaire. Sa forme est lamelleuse, son éclat métallique, sa ténacité très-faible, sa couleur bleuâtre, ce qui lui donne l'apparence de la plombagine ou du carbure de fer. Sa pesanteur spécifique est de 4,946 à la température de 16°,5. Il a une odeur analogue à celle du chlore ou plutôt du chlorure de soufre. Il possède à un haut degré les propriétés électriques du gaz oxygène : aussi, lorsqu'on soumet une dissolution d'acide iodhydrique à l'action de la pile, l'iode se porte-t-il du côté positif, et l'hydrogène du côté négatif. Appliqué sur la peau, il la colore en jaune; cette couleur disparaît à mesure qu'il se gazéifie.

L'iode entre en fusion à 107 degrés et en ébullition à environ 175 degrés; cependant, en raison de sa tension, il se vaporise dans l'eau bouillante. Sa vapeur, dont la densité est de 8,716, est toujours d'un beau violet. L'oxygène n'agit directement sur l'iode ni à froid ni à chaud, cependant on connaît plusieurs combinaisons d'iode et d'oxygène; mais pour que l'action ait lieu, il faut que l'oxygène soit à l'état de gaz naissant.

Son action sur l'hydrogène est très-grande, et analogue, quoique à 1 degré plus faible, à celle du brome et du chlore. Aussi l'enlève-t-il à une multitude de corps.

L'iode n'existe pas à l'état de pureté dans la nature, mais en combinaison on l'a trouvé dans beaucoup de fucus, dans les éponges, dans divers mollusques marins, uni à l'argent, etc.

Usages. — L'iode ne s'emploie que dans les laboratoires.

Suivant M. Orfila, il détermine l'ulcération de la membrane muqueuse et la mort, à la dose d'un gros à un gros et demi.

Phosphore. — Le phosphore est solide, insipide. Pur, il est si flexible, que l'on peut le plier jusqu'à sept ou huit fois en sens inverse sans le rompre, il suffit de $\frac{1}{600}$ de soufre pour le rendre cassant. L'ongle le raye sans peine; tous les instruments tranchants le coupent facilement. Sa pesanteur spécifique est de 1,77. Son odeur est faible, et rappelle celle du gaz hydrogène ordinaire ou celle de l'arsenic en vapeur. Tantôt il est transparent et sans couleur, tantôt transparent et jaunâtre, tantôt demi-transparent comme la corne, tantôt noir et opaque; ce qui dépend de l'arrangement de ses molécules. Placé dans l'obscurité, il est toujours lumineux, pourvu toutefois qu'il ait le contact de l'air : de là même le nom qu'on lui a donné.

Le phosphore entre en fusion à 43 degrés. Exposé à une chaleur de 60 à 70 degrés et refroidi subitement, il devient noir; en le laissant refroidir très-lentement, il reste transparent et sans couleur. Un refroidissement modéré lui donne quelquefois l'aspect corné : de noir, il redevient incolore par la fusion, pour devenir noir de nouveau par un refroidissement subit. Si l'on perce, quand il est refroidi, la croûte qui se forme à sa surface, et si l'on fait écouler les parties encore liquides, on trouve les autres cristallisées en aiguilles ou en octaèdres. Si, pendant qu'il est fondu, on l'agite avec de l'alcool, de l'éther ou de l'eau jusqu'à refroidissement, on peut le réduire en poudre plus ou moins fine. Chauffé en vaisseau clos, il se volatilise: de là vient qu'on peut le distiller. Cette distillation a lieu bien au-dessous de la chaleur rouge, et doit être conduite avec beaucoup de précaution, car ce corps brûle avec une grande facilité.

Exposé aux rayons solaires, le phosphore devient rouge aussi bien dans le vide, dans l'hydrogène et l'azote que dans l'air. On attribue cette propriété à un peu d'eau qui serait décomposée et formerait de l'oxyde rouge.

Aussitôt que le phosphore se trouve en contact avec le gaz oxygène à une température élevée, il y brûle avec éclat, et il se produit des vapeurs blanches d'acide phosphorique anhydre et aussi toujours un peu d'oxyde rouge. Au-dessous de 27 degrés et sous la pression de 76 centimètres, le phosphore n'agit point sur l'oxygène, à moins que la pression ne soit diminuée; mais toutefois, quelle que soit cette diminution, l'action n'a plus lieu à 5 degrés. Si, au lieu de diminuer la pression, on l'augmente, il faudra une température plus élevée pour déterminer la combustion du phosphore.

Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'addition d'une petite quantité d'azote, d'hydrogène ou d'acide carbonique, produit le même effet qu'une diminution de pression, ce qui fait penser que les atomes d'un même gaz ont encore une certaine force attractive qui est diminuée par la présence d'un autre gaz. Cette propriété nous explique

assez pourquoi le phosphore brûle à l'air en donnant lieu à de l'acide phosphatique.

L'eau ne dissout point le phosphore; mais si cette eau contient de l'air, il se fait de l'oxyde rouge, surtout sous l'influence de la lumière, et probablement de l'acide phosphoreux qui se dissout dans l'eau; le fait est que l'eau devient acide.

Le phosphore ne se trouve pas pur, mais à l'état de combinaison, dans les os constituant du phosphate de chaux; il fait partie de la matière cérébrale et des nerfs et de la laitance de la carpe.

Ses usages. — Le phosphore est employé pour analyser l'air, et pour obtenir quelques produits particuliers dans les laboratoires. On en fait des briquets phosphoriques. Son emploi, dans la fabrication des allumettes chimiques, est très-grand. Pour les préparer, on enduit des fragments de bois soufré avec une pâte de chlorate de potasse, de résine et de phosphore en poudre; quand la pâte est sèche, on la recouvre d'un vernis gommeux, destiné à protéger le phosphore contre l'action de l'air. Cette opération est extrêmement dangereuse.

Son action sur l'économie animale est des plus violentes; il est considéré comme un puissant stimulant dont l'action principale est d'exciter les organes génitaux.

Arsenic. — L'arsenic est solide, gris d'acier, fragile, brillant, lorsque sa cassure est récente, terne lorsqu'elle est ancienne. Sa texture est grenue et quelquefois un peu lamelleuse ou plutôt écailleuse; frotté entre les mains, il leur communique une odeur sensible. Il n'a point de saveur; sa pesanteur spécifique est de 8,308. C'est un poison dont on ne saurait trop se défier. Soumis à une chaleur d'environ 186 degrés, sous la pression atmosphérique, l'arsenic se sublime lentement sans se fondre, et se cristallise en tétraèdres. Au-dessus de 180 degrés, sous la même pression, il se sublime sans se fondre encore et d'autant plus rapidement que le degré de chaleur est plus grand. Le meilleur moyen de fondre l'arsenic paraît être de le chauffer sous une pression beaucoup plus considérable que celle de l'atmosphère; une fois fondu, on peut le couler en lingots ou en lames. A la température ordinaire, l'arsenic n'agit sur le gaz oxygène et sur l'air qu'autant qu'ils sont humides; dans les deux cas, l'action est lente et le produit qui se forme est un protoxyde noir. A une température élevée, l'arsenic agit fortement, au contraire, sur l'oxygène sec ou humide. Il absorbe rapidement ce gaz, et il en résulte du deutoxyde blanc qui se sublime, et un dégagement de calorique et de lumière bleuâtre. Son action sur l'air ne diffère de celle qu'il exerce sur le gaz oxygène qu'en ce qu'elle est moins vive, et qu'il n'y a pas de lumière dégagée. Voilà pourquoi, lorsqu'on projette de l'arsenic en poudre sur des charbons ou dans un têt incandescent, il se dissipe promptement à l'état d'oxyde sous forme de vapeurs blanches très-épaisses. Ces vapeurs, dangereuses à respirer, sont même tellement remarquables par leur odeur, qui se rapproche de celle de l'ail ou du phosphore, que quand, dans le grillage d'une mine, cette odeur se manifeste accompagnée de quelque fumée blanche, c'est un signe presque certain que la mine contient de l'arsenic. Pulvérisé et mis en contact avec l'eau dans une capsule, il s'oxyde peu à peu par l'oxygène de l'air que cette eau contient et

qu'elle absorbe successivement, et il s'y dissout en assez grande quantité pour tuer les mouches qui la boivent.

Lorsque l'oxygène et l'air humide sont à une température élevée, l'oxygène est promptement absorbé, et il se forme un acide blanc appelé *arsénieux*. Plusieurs métalloïdes, l'hydrogène même, se combinent avec l'arsenic, de même que la plupart des métaux.

L'hydrogène arséniqué a été, dans ces derniers temps, le sujet des recherches les plus actives de la part de beaucoup de chimistes; car, comme on le sait, les recherches médico-légales sur l'arsenic sont fondées surtout sur la propriété que possède l'arsenic de se combiner facilement avec l'hydrogène.

La première idée en est venue à Marsh, qui a donné et décrit un procédé et un appareil qui portent son nom, et au moyen desquels on reconnaît des quantités presque insaisissables d'arsenic, quantités qui eussent échappé aux anciens moyens d'investigation. Son procédé consiste à former du gaz hydrogène par le moyen du zinc et de l'acide sulfurique purs, au sein même du liquide que l'on soupçonne. L'hydrogène qui s'en dégage se trouve chargé d'une quantité d'arsenic dont on rend la présence palpable de la manière suivante : On laisse se dégager, sous forme de jet, l'hydrogène que l'on enflamme, et tandis qu'il brûle, on approche de la flamme une soucoupe de porcelaine ou un morceau de verre froid, qui ne tarde pas à se couvrir de taches miroitantes, si la liqueur contient de l'arsenic. Malheureusement on reconnut plus tard que quelques autres métaux possédaient la propriété de donner de pareilles taches; voilà pourquoi tant de chimistes se sont occupés de cette importante question.

L'arsenic se rencontre sous quatre états dans la nature : à l'état natif, à l'état d'oxyde, à l'état de combinaison binaire avec le soufre et plusieurs métaux, à l'état d'arséniate.

Ses usages. — Les usages de l'arsenic sont très-bornés; uni au platine, à l'étain et au cuivre, il forme un alliage propre à faire des miroirs de télescope. Il est employé dans les manufactures de porcelaine, à l'état de combinaison, avec le cobalt, pour leur donner cette belle couleur bleue.

Carbone. — Le charbon, tel qu'on le voit journellement, contient toujours de l'hydrogène et de la cendre; de là la nécessité de donner un nom particulier au charbon pur : on a adopté celui de *carbone*.

Le carbone est toujours solide, sans odeur, sans saveur; mais la plupart de ses autres propriétés physiques sont variables. Le plus souvent il est noir, sans forme régulière, facile à réduire en poudre, comme celui qui provient du bois. Quelquefois le carbone est compacte, friable, luisant, ressemblant à la houille, du reste noir et sans forme régulière comme le précédent. Sous cet état, les minéralogistes l'appellent *anthracite*. L'anthracite contient souvent de l'alumine, de la silice et de l'oxyde de fer; il en est, à la vérité, qui n'en contient que très-peu.

Plus rarement, le carbone est cristallisé et si dur, qu'il raye tous les corps et n'est rayé par aucun. Dans cet état il constitue le *diamant*. Les diamants sont ordinairement limpides, tantôt sans couleur, tantôt colorés en gris, en brun, en rose, en bleu clair; il y en a aussi

de jaunâtres et de vert-serin. Quelques-uns ont huit faces, formant un octaèdre régulier; d'autres en ont douze, d'autres vingt-quatre, d'autres quarante-huit. La pesanteur spécifique des diamants varie entre 3,5 et 3,55; d'où l'on voit qu'elle est plus grande que celle de l'anthracite. On sait, d'ailleurs, que celle-ci est plus grande que celle du charbon de bois. Sa poussière est noirâtre, même quand elle provient de diamants incolores. Sa puissance réfractive est de 3,1964. Chauffé dans des vaisseaux clos, il ne s'altère pas; mais, si on le chauffe en présence de l'air, il ne tarde pas, si la température est élevée, à s'emparer de l'oxygène de l'air et à passer à l'état d'acide carbonique.

La *plombagine* (graphite, mine de plomb) est une variété de carbone plus ou moins impure, qui se présente en masses informes d'un gris noirâtre avec le brillant métallique; c'est un mélange de terre et d'oxyde de fer. On l'emploie pour faire des crayons.

La *houille* est une matière que l'on trouve en masse assez considérable dans le sein de la terre, et qui est essentiellement formée de charbon et de bitume associés à une proportion variable de matières terreuses. C'est le combustible minéral le plus abondant et sans contredit le plus précieux. C'est la base de toutes les industries qui ont besoin de production d'une forte chaleur.

Ce que l'on nomme vulgairement charbon est un mélange de beaucoup de carbone, d'un peu d'hydrogène et de plus ou moins de sels qui constituent la cendre. Dans les charbons qui proviennent des matières animales, on trouve une assez grande quantité d'azote. La quantité de carbone que contient le charbon varie selon l'espèce de charbon. Par exemple, le charbon de sapin contient 98,56 de carbone, celui de bois ordinaire non calciné 97,85, celui qui provient des matières animales non terreuses n'en contient que 71,7; le reste est de l'azote. On peut donc facilement reconnaître le charbon végétal ou hydrogéné et le charbon animal ou azoté.

Le charbon végétal est solide, noir, fragile, très-poreux, inodore, insipide et plus pesant que l'eau. S'il contient peu de matières étrangères, il conduit bien le calorique; dans le cas contraire, il le conduit très-peu. Soumis à une forte chaleur, en vase clos, le charbon perd l'eau qu'il avait absorbée, et donne de plus une certaine quantité de gaz composé d'oxyde de carbone, d'hydrogène et peut-être d'hydrogène carboné.

L'oxygène se combine très-facilement; la combinaison se fait directement, et donne lieu tantôt à de l'acide carbonique, tantôt à de l'oxyde de carbone.

Le carbone brûlé avec l'oxygène donne de l'acide carbonique qui trouble l'eau de chaux.

Ses usages. — Les usages du carbone impur ou du charbon proprement dit sont très-multipliés; partout on l'emploie comme combustible. On s'en sert dans les usines, non-seulement pour se procurer la chaleur dont on a besoin, mais encore pour extraire les métaux de leurs mines, pour les désoxygéner et les réduire. Mêlé au soufre et au salpêtre, il constitue la poudre à canon; incorporé à l'état de noir de fumée avec des corps gras, il forme l'encre d'imprimerie.

Il fournit des tons très-chauds à la peinture dans le noir d'ivoire, etc. ; en le combinant en petite proportion avec le fer, on obtient l'acier.

La propriété qu'il possède d'absorber les gaz, etc., le rend très-propre à prévenir la putréfaction des eaux, des viandes, et même à désinfecter celles qui commencent à se putréfier. Que l'on fasse bouillir de la viande trop avancée avec de l'eau et que l'on y ajoute du charbon, elle perdra sa mauvaise odeur; que l'on filtre de l'eau bourbeuse à travers une couche de quelques pouces de ce corps combustible grossièrement pilé, et qu'on la laisse exposée à l'air pendant vingt-quatre heures, elle deviendra très-limpide et bonne à boire. On emploie encore le charbon avec succès pour clarifier, décolorer les liquides, particulièrement les sirops, pour purifier le miel et lui enlever tout à la fois sa couleur, son odeur et son goût âcre.

Bore. — Le bore ne se trouve jamais à l'état de pureté dans la nature; il fait partie de trois combinaisons naturelles : ce sont l'acide borique, le borate de soude et le borate de magnésie. Le bore est solide, pulvérulent, insipide, inodore, d'un brun verdâtre, d'une pesanteur spécifique plus grande que celle de l'eau. Soumis à l'action d'une forte chaleur, il n'éprouve aucune altération, si ce n'est qu'il se racornit un peu; d'où il suit qu'il est infusible.

L'oxygène à froid n'a aucune action sur le bore, mais à chaud la combinaison s'opère promptement; il en résulte de l'acide borique qui, en se fondant, recouvre toujours un peu de bore, que l'on a pris pendant quelque temps pour de l'oxyde de bore.

Le bore possède la propriété de se diviser dans l'eau pure au point de filtrer avec elle; mais pour peu que l'eau contienne de sels, ce phénomène n'a plus lieu : il en est de même si l'on chauffe fortement le bore. On l'obtient en décomposant l'acide borique avec du potassium ou du sodium. On réduit en fragments le métal et l'acide borique; on les place, couche par couche, dans un tube de cuivre, que l'on chauffe ensuite avec la lampe à alcool; bientôt le métal s'empare de l'oxygène de l'acide borique, forme de l'oxyde qui se combine à une certaine quantité d'acide borique, pour former du borate, pendant que le bore de l'acide décomposé devient libre; l'eau bouillante dissout le borate, et le filtre retient le bore. Le bore est sans usages.

Brome. — Le brome est un corps récemment découvert par M. Balard ; il est liquide à la température ordinaire, d'un rouge brun en masse et d'un rouge hyacinthe en couche mince; son odeur, forte, désagréable, est analogue à celle du chlore; sa saveur est très-caustique; comme l'iode, il colore fortement la peau en jaune. C'est un poison énergique; une goutte, déposée dans le bec d'un oiseau, suffit pour le tuer. Exposé à un froid de 20 degrés, il se solidifie et devient cassant; à + 47° il entre en ébullition et répand des vapeurs rouges comme celles de l'acide hypo-azotique. Il ne se combine pas directement avec l'oxygène; cependant, à l'état de gaz naissant, la combinaison se fait, et l'on connaît même plusieurs combinaisons.

Son affinité pour l'hydrogène est beaucoup plus grande; aussi s'y combine-t-il, sous l'influence solaire, pour former du gaz bromhydrique; il a plus d'affinité pour l'hydrogène que l'iode.

On extrait le brome du bromure de magnésium, lequel se rencontre dans les eaux mères de salines. On prend une certaine quantité de ces eaux mères, on y fait arriver un courant de chlore, qui forme du *chlorure de magnésium* et met le brome à nu; celui-ci reste en dissolution dans la liqueur. On agite la liqueur avec de l'éther, qui dissout le brome et décolore le liquide. On verse ensuite une dissolution de potasse qui forme, en cédant de son oxygène à une portion de brome, du bromate de potasse et du bromure de potassium; on évapore les liqueurs à siccité, et l'on enlève le résidu formé de bromure et de bromate. Par ce moyen le bromate, en perdant tout son oxygène, devient également bromure de potassium.

Fluor. — Ce corps ne pouvant être obtenu à l'état libre, parce qu'il corrode tous les vases dans lesquels on a cherché à l'obtenir, n'a pu ni être étudié, ni recevoir aucune application. On sait seulement qu'il est, après l'oxygène, le plus électro-négatif de tous les autres corps, puisque toutes ses combinaisons, exposées à l'action de la pile, donnent toujours lieu, au pôle positif, à la formation d'un fluorure par la combinaison du fluor avec le fil conducteur.

COMBINAISONS DE L'OXYGÈNE ET DE L'HYDROGÈNE AVEC LES AUTRES MÉTALLOÏDES ET DE CES MÉTALLOÏDES ENTRE EUX.

Usage des signes ou formules chimiques. — Au moyen de signes, on détermine en chimie, de la manière la plus nette, la composition des corps, tant sous le rapport de leurs éléments, que sous celui du nombre de leurs atomes. On désigne les corps simples par l'initiale de leur nom latin, suivi de la deuxième ou de la troisième lettre, suivant que la première et la deuxieme sont communes à plusieurs corps.

Le nombre d'atomes qui se trouvent dans chaque combinaison est désigné par des chiffres. Un chiffre à gauche multiplie tous les atomes placés à sa droite, jusqu'à la séparation de la formule par le signe +; un petit chiffre placé à la droite de la lettre, en haut, comme un exposant algébrique, multiplie seulement les poids atomiques placés immédiatement à gauche. Exemple : SO^3 signifie 1 atome de soufre et 3 d'oxygène, ou 1 atome d'acide sulfurique; $2SO^3$ signifie 2 atomes d'acide sulfurique, ou 2 atomes de soufre et 6 d'oxygène.

Ordinairement c'est le principe électro-négatif qui entre dans les combinaisons pour plus de 1 atome; mais quelquefois le principe électropositif y entre pour 2 atomes : alors on admet que la lettre barrée signifie 2 atomes.

Comme l'oxygène revient souvent dans les combinaisons, pour simplifier la formule, M. Berzelius a adopté de remplacer le signe O par des points qu'on met au-dessus de la lettre désignant l'autre élément de la combinaison.

Voici un tableau contenant le nom des corps simples, leur signe chimique et le poids de leur atome :

	POIDS ATOMIQUE.			POIDS ATOMIQUE.	
Oxygène.......	O	100,000	Rhodium.......	R	651,387
Hydrogène......	H	6,240	Argent.........	Ag	675,800
Azote.........	N	88,518	Mercure........	Hg	1265,825
Soufre.........	S	201,165	Cuivre.........	Cu	395,695
Phosphore	P	196,143	Uranium........	U	750,000
Chlore.........	Cl	221,326	Bismuth........	Bi	1330,337
Iode	I	789,750	Étain..........	Sn	735,294
Brome.........	Br	489,153	Plomb..........	Pb	1294,498
Fluor..........	F	116,900	Cadmium.......	Cd	696,767
Carbone........	C	75,000	Zinc...........	Zn	412,630
Bore...........	B	136,204	Nickel..........	Ni	369,675
Silicium........	Si	277,312	Cobalt..........	Co	368,991
Sélénium.......	Se	494,583	Fer............	Fe	339,205
Arsenic........	As	470,042	Manganèse......	Mn	345,887
Chrome........	Cr	351,815	Cérium.........	Ce	574,696
Vanadium......	V	855,840	Thorium.......	Th	884,900
Molybdène......	Mo	598,520	Zirconium......	Zr	420,201
Tungstène......	W	1183,000	Yttrium........	Y	402,514
Antimoine......	Sb	806,452	Glucium.......	G	331,261
Tellure.........	Te	801,76	Aluminium.....	Al	171,166
Tantale........	Ta	1153,715	Magnésium.....	Mg	158,352
Titane..........	Ti	303,662	Calcium........	Ca	256,019
Or.............	Au	1243,013	Strontium......	Sr	547,284
Osmium........	Os	1244,487	Barium.........	Ba	856,880
Iridium........	Ir	1233,499	Lithium........	L	80,375
Platine.........	Pt	1233,499	Sodium........	Na	290,897
Palladium......	Pd	665,899	Potassium......	K	489,916

On voit que O vaut 100 d'oxygène, P vaut 196,143 de phosphore, S vaut 201,165 de soufre, etc.

COMBINAISONS DES MÉTALLOÏDES ENTRE EUX.

Les combinaisons ne sont pas, à beaucoup près, aussi nombreuses qu'elles pourraient l'être, parce que tous les métalloïdes ne se combinent point les uns avec les autres. La plupart d'entre elles sont binaires, quelques-unes seulement sont ternaires. Tous les métalloïdes peuvent se combiner avec l'oxygène : de ces combinaisons il résulte tantôt des corps neutres, tantôt des corps dont la propriété essentielle est d'être acides, c'est-à-dire de pouvoir se combiner avec les différentes *bases salifiables* pour former des sels. Ces combinaisons constituent les oxydes ou les acides métalliques.

COMBINAISONS DE L'HYDROGÈNE.

L'hydrogène, en se combinant avec les métalloïdes, donne naissance à des composés dont les propriétés sont si différentes, qu'on peut les diviser en trois séries bien tranchées.

La première comprendra les composés neutres.

La seconde comprendra ceux dont les propriétés sont acides : on les nomme *hydracides*.

La troisième comprendra ceux dont les propriétés sont alcalines : telle est l'*ammoniaque*.

Les combinaisons neutres que forme l'hydrogène portent généralement le nom d'*hydrures ;* parmi elles il n'en est que deux qui offrent de l'intérêt : ce sont celles qu'il forme avec le carbone et avec le phosphore.

Combinaisons de l'hydrogène avec le carbone.

L'hydrogène s'unit au carbone dans une foule de circonstances, de manière à donner lieu à du gaz hydrogène carboné. En effet, ce gaz est un produit de la digestion ; la vase des marais en contient toujours ; il se rencontre au sein des houillères ; il s'en forme enfin toutes les fois que les matières végétales et animales, abandonnées à elles-mêmes, éprouvent la décomposition putride ; enfin on ne saurait, pour ainsi dire, faire d'expériences sur les matières organisées, sans qu'il en résulte plus ou moins d'hydrogène carboné.

Protocarbure d'hydrogène. — L'hydrogène protocarburé, ou gaz inflammable des marais, est insipide, inodore, sans couleur, insoluble dans l'eau. Sa densité égale 0,5595, c'est-à-dire deux fois celle de l'hydrogène, plus une fois celle de la vapeur du carbone. Mêlé à l'air ou l'oxygène, il détone sur-le-champ par l'étincelle électrique ; si l'on allume un jet de ce gaz dans l'air, il y brûle avec une flamme jaunâtre. Le chlore peut le décomposer instantanément ; à la température rouge, il s'empare de l'hydrogène, forme de l'acide chlorhydrique et met le carbone à nu. Ce gaz se trouve dans la vase des marais et des eaux stagnantes.

L'analyse y a démontré un peu de gaz carbonique, d'azote et d'oxygène ; on peut en séparer l'oxygène avec le phosphore, et l'acide carbonique avec de la potasse ; mais on ne peut le priver du peu d'azote qu'il contient. Abstraction faite du gaz que nous venons de citer, il absorbe en brûlant deux fois son volume d'oxygène, et produit un volume d'acide carbonique égal au sien ; d'où l'on peut voir qu'il est formé d'un volume de vapeur de carbone et de deux volumes d'hydrogène condensés en un seul $= CH^2$.

Bicarbure d'hydrogène. — L'hydrogène bicarboné, ou le gaz de l'éclairage, est incolore, insipide, d'une odeur empyreumatique, éteignant les corps en combustion ; sa densité = 0,9852.

Quand on le fait traverser un tube incandescent, il est décomposé en charbon qui se dépose, et en gaz dont le volume est presque double. Si la chaleur est assez forte, et surtout si l'on fait passer le gaz à plusieurs reprises différentes, ou mieux si l'on y fait passer une grande quantité d'étincelles électriques, on obtient le double d'un gaz qui n'est plus que de l'hydrogène pur ; d'où il résulte que tout le charbon s'est déposé. L'air ni l'oxygène ne le décomposent à la température ordinaire, pendant qu'au contraire l'un et l'autre le décomposent à une température élevée, en formant de l'eau et de l'acide carbonique. Si l'air ou l'oxygène était préalablement mêlé au gaz au moment où l'on approcherait une bougie enflammée, il y aurait instantanément détonation.

L'eau en dissout le sixième de son volume.

Le chlore peut le décomposer et former un liquide oléagineux, qu'on

nomme *hydrobicarbure de chlore* ou qui serait mieux appelé *chlorhydrate de quadricarbure d'hydrogène*. On admet alors que le chlore se combine à la moitié de l'hydrogène pour former l'acide chlorhydrique, pendant que l'autre moitié resterait combinée à tout le carbone. Cette propriété lui a valu le nom de *gaz oléfiant*.

Le soufre et l'iode peuvent aussi le décomposer, le premier en formant de l'acide sulfhydrique avec son hydrogène, et le second en formant un composé cristallisé, analogue par sa composition à celui que forme le chlore, mais dans lequel le chlore est remplacé par l'iode.

L'analyse a démontré que ce gaz était formé de deux volumes de vapeur de carbone, et de deux volumes d'hydrogène condensés en un seul $= C^2H^2$ ou CH.

Ce gaz est employé pour l'éclairage; mais celui dont on se sert provient soit de la distillation de la houille, soit de la décomposition de l'huile par une haute température. Aujourd'hui que l'expérience a appris que la houille fournit ce gaz en grande quantité, on se sert avec avantage de ce produit qui non-seulement fournit le gaz, mais donne encore pour résidu une matière combustible que l'on désigne sous le nom de *coke*. Quelle qu'ait été la substance dont on a extrait le gaz, on a été obligé de le purifier des matières étrangères qui le contiennent et qui ne tarderaient pas à obstruer les conduits.

M. Houzeau-Muiron tire aujourd'hui un parti très-grand des eaux de savon qui ont servi au dégraissage, et qui avant lui étaient pour les fabriques une cause de gêne et d'insalubrité. En traitant par l'acide sulfurique, on élimine la matière grasse, qui consiste en huile non altérée, en acide gras et en matières animales, et qui surnage la liqueur. Celle-ci contient du sulfate de potasse ou de soude, dont on peut encore tirer parti. Quant à la matière grasse, après quelques manipulations préalables, on la traite comme nous l'avons dit plus haut.

L'odeur infecte qui accompagne ce gaz, et qui est due à des huiles pyrogénées, présente un avantage incontestable. Elle avertit facilement des dangers auxquels exposent les fuites de gaz, et qui sont les explosions fréquentes et l'asphyxie.

Combinaisons du phosphore et de l'hydrogène.

On connaît deux espèces d'hydrogène phosphoré; nous les désignerons sous les noms d'*hydrogène perphosphoré* et d'*hydrogène protophosphoré*.

Hydrogène perphosphoré. — L'hydrogène perphosphoré est gazeux, sans couleur. Son odeur est très-forte, analogue à celle de l'ail, de l'oignon; sa saveur est amère et sa pesanteur spécifique est de 0,9022. Nombre de corps sont capables de l'altérer : en l'exposant à une haute température, il s'en dépose instantanément du phosphore; si l'on fait passer des étincelles électriques à travers ce gaz pendant quelque temps, le phosphore se précipitera également, et l'hydrogène devenu libre occupera le même volume que combiné; qu'on le chauffe avec le soufre dans un vase bien sec, il se formera du sulfure de phosphore et du gaz hydrogène sulfuré égal en volume au gaz hydrogène perphosphoré lui-même; que l'on mette de l'iode dans un tube bien sec, et qu'après avoir chassé l'air du tube on le remplisse de gaz

hydrogène phosphoré, on obtiendra de l'iodure de phosphore et du gaz hydrogène; le volume de celui-ci sera encore le même que celui du gaz phosphoré.

Le chlore agit aussi avec beaucoup de force sur l'hydrogène perphosphoré. A peine une bulle de l'un de ces gaz arrive-t-elle dans un vase où se trouve l'autre, qu'il y a inflammation et production d'acide hydrochlorique, et en même temps de phosphure de chlore, surtout si celui-ci est en excès. Le mélange disparaît complétement lorsqu'il se compose de trois volumes de chlore, d'un volume d'hydrogène phosphoré, et que l'expérience se fait sur l'eau.

Plusieurs métaux ont également la propriété de décomposer l'hydrogène phosphoré, tels sont le potassium et le sodium. Mais de tous les corps, ceux qui nous présentent les phénomènes les plus remarquables avec l'hydrogène perphosphoré, sont l'oxygène et l'air : lorsqu'on fait passer du gaz oxygène dans un tube étroit qui contient de l'hydrogène phosphoré, tout à coup des vapeurs blanches apparaissent sans aucun dégagement de lumière; le phosphore s'acidifie et se dépose; l'hydrogène au contraire reste libre. Mais lorsque le mélange se fait dans de larges tubes, il en résulte tout à coup aussi des vapeurs blanches, et de plus une combustion vive, de l'eau et de l'acide phosphorique. Cette différence provient de ce que dans le premier cas les parois très-rapprochées du vase enlèvent la chaleur à mesure qu'elle se produit, et qu'elle n'est jamais assez forte pour permettre à l'hydrogène de brûler, ce qui n'a pas lieu dans le second cas; aussi l'absorption de l'oxygène est-elle dans celui-ci d'une fois et demie le volume de l'hydrogène phosphoré, tandis que dans l'autre ce dernier gaz n'absorbe qu'un volume égal au sien d'oxygène : l'air produit des effets analogues.

Du gaz hydrogène protophosphoré. — Ce gaz est une sorte d'hydrogène phosphoré qui n'est point inflammable par le contact de l'air à la température ordinaire; il est sans couleur, et a une odeur forte, désagréable, analogue à celle de l'oxyde d'arsenic en vapeur. Sa densité est de 0,87, d'après M. Davy; M. Thomson la croit de 0,9716, parce qu'il considère ce gaz comme formé de 1 volume d'hydrogène perphosphoré et de 1 volume d'hydrogène condensés en un seul, ou de $0,9022 + 0,0694$.

Ce gaz ne se décompose pas à la température ordinaire, du moins dans l'intervalle de quelques jours. Il ne prend point feu spontanément dans l'air et le gaz oxygène, comme l'hydrogène perphosphoré, si ce n'est sous une faible pression. Il ne s'y enflamme qu'à l'aide de la chaleur sous la pression ordinaire. On le brûle facilement en le faisant passer dans une éprouvette, la renversant et y plongeant une bougie allumée. Un mélange de ce gaz et d'un excès d'oxygène détone fortement à 150 degrés environ, à plus forte raison par le contact de la flamme. Une étincelle électrique le fait également détoner. Les produits de la combustion sont de l'eau et de l'acide phosphorique.

Il nous présente avec le chlore les mêmes phénomènes qu'avec le gaz hydrogène perphosphoré : seulement, au lieu de 3 volumes de chlore, il faut en employer 4 sur 1 de gaz phosphoré, pour que le

mélange disparaisse complétement, lorsqu'on fait l'expérience dans des vases pleins d'eau.

Le soufre et le potassium en opèrent facilement la décomposition à la chaleur de la lampe; il en résulte avec le premier du phosphore de soufre et du gaz hydrogène sulfuré, et avec le second, du gaz hydrogène et du phosphure de potassium; d'après M. Thomson, ce gaz doit être un composé de 2 volumes de gaz hydrogène unis avec la même quantité de phosphore que celle qui existe dans un volume de gaz hydrogène phosphoré, et que ces volumes sont condensés dans un seul.

DES COMBINAISONS DU CARBONE.

Le carbone se combine avec l'hydrogène, le soufre, le chlore et l'azote; mais parmi ces combinaisons une seule est importante, c'est la combinaison du carbone et de l'azote. On désigne ces sortes de combinaisons sous le nom de *carbures*, ce qui n'est pas conforme à la nomenclature, puisque dans le *carbure de chlore*, c'est le chlore qui est le plus électro-négatif; il vaudrait donc mieux dire *chlorure de carbone;* néanmoins il n'est point indifférent de désigner ce corps par ces deux manières, quand on emploie les mots *proto* ou *deuto*. En effet pour employer ces deux dénominations pour les chlorures de carbone, nous dirons : *protochlorure de carbone* ou *deutocarbure de chlore* pour désigner le même corps.

Combinaison du soufre et du carbone.

Cette combinaison est du *sulfure de carbone*, qui est liquide, transparent, très-volatil, d'une odeur très-désagréable, et d'une saveur âcre et caustique; sa pesanteur spécifique = 1,263; il bout à 45 degrés; brûlé à l'air, il s'enflamme en formant de l'acide sulfureux et de l'acide carbonique; il est formé de 1 atome de soufre et de 1 atome de carbone; d'où la formule CS.

Combinaison du chlore et du carbone.

Le chlore se combine en deux proportions avec le carbone. On obtient : 1°. Le *protochlorure de carbone*, qui est liquide, incolore et limpide; on se le procure facilement en décomposant par la chaleur le sesquichlorure de carbone, et en le faisant traverser lentement, par distillation, un tube de porcelaine incandescent; il est composé de 1 atome de chlore et de 1 atome de carbone; sa formule est CCl.

2°. Le *sesquichlorure de carbone*, qui est solide, cristallin, très-friable, transparent, incolore, presque insipide, d'une odeur analogue à celle du camphre. Il fond à 160 degrés et bout à 182. Il est volatil; il est composé de 3 atomes de chlore et de 2 atomes de carbone; sa formule est C^2Cl^3.

Combinaison de l'azote et du carbone.

L'azote et le carbone forment le cyanogène, qui est gazeux, inflammable, d'une odeur très-vive et pénétrante. Sa densité est de 1,8064. Il rougit la teinture de tournesol; comprimé et refroidi en même temps, il se liquéfie; il ne se décompose pas à une très-forte température; il a très-peu d'affinité pour l'oxygène, il ne s'unit qu'autant

que les deux gaz se trouvent sous l'influence des alcalis; l'hydrogène ne s'y combine également qu'à l'état naissant; de là l'acide cyanhydrique.

La propriété la plus remarquable du cyanogène consiste dans la manière dont il se combine aux métaux; en effet, il s'y combine sans décomposition et tout à fait de la même manière que le ferait le chlore, le brome, l'iode, etc., et forme des combinaisons analogues aux chlorures, iodures, etc., que l'on nomme *cyanures*: L'eau en dissout à peu près quatre fois et demie son volume.

DES COMBINAISONS DU PHOSPHORE.

Le phosphore se combine avec l'hydrogène, le soufre, l'iode et le chlore.

Combinaison du soufre et du phosphore.

Le phosphore et le soufre se combinent en plusieurs proportions; ces combinaisons varient beaucoup. Le sulfure de phosphore est toujours jaunâtre, quelquefois liquide, ce qui dépend de la quantité de phosphore; en effet, si le sulfure est formé de 7 parties de phosphore et de 5 de soufre, il est toujours liquide, même sous zéro, et toujours plus pesant que l'eau. Il est volatil; exposé à la chaleur, au contact de l'air et de l'oxygène, il s'enflamme et donne lieu à de l'acide sulfureux et à de l'acide phosphorique. Ce corps est formé de 7 parties de phosphore et 5 de soufre; conservé sous l'eau pendant quelque temps, il abandonne des cristaux de soufre pur, en même temps qu'il perd de sa fusibilité; exposé quelques heures à une température de 3 à 4 degrés, il se prend en une masse cristalline qui paraît formée de 1 de soufre et de 2 de phosphore; sa formule est SP^2.

Combinaison de l'iode et du phosphore.

Le phosphore et l'iode se combinent en diverses proportions et toujours avec dégagement de calorique et de lumière. La seule combinaison qui soit quelquefois employée est celle qui résulte de 1 de phosphore et de 8 d'iode. L'*iodure de phosphore* est rouge-orangé brun, fusible à 100 degrés, volatil; mis en conctact avec l'eau, il la décompose en donnant lieu à de l'acide iodhydrique, de l'acide phosphoreux et du phosphore d'hydrogène. Il est employé pour faire l'acide iodhydrique.

Combinaison du chlore et du phosphore.

Le chlore et le phosphore se combinent ensemble, même à la température ordinaire, avec dégagement de calorique et de lumière; de cette combinaison résultent, selon les proportions du chlore, deux composés bien déterminés : 1° le *protochlorure de phosphore;* ce chlorure est liquide, incolore, transparent, plus pesant que l'eau, très-fumant et très-caustique, rougissant le tournesol sans rougir le papier bien sec : de là le nom d'*acide chlorophosphoreux*; 2° le *deutochlorure de phosphore;* il est solide, d'un blanc de neige, très-volatil, mais moins que le protochlorure : sa vapeur rougit le papier de tournesol, même bien sec, d'où lui est venu le nom de *chlorophosphorique;* il est formé de 5 atomes de chlore et 1 atome de phosphore; sa formule est PCl^5.

DES COMBINAISONS DU SOUFRE.

Le soufre se combine à l'hydrogène, au carbone, au phosphore, au sélénium, à l'iode et au chlore.

Combinaison de l'iode et du soufre.

L'iode se combine facilement au soufre, et il en résulte un iodure rayonné et brillant comme celui d'antimoine. Il est très-peu stable. Exposé à une température un peu élevée, l'iode s'en sépare. On l'obtient en chauffant légèrement l'iode et le soufre dans un tube de verre.

Combinaisons du chlore et du soufre.

Le chlore s'unit en deux proportions avec le soufre : de là un protochlorure et un bichlorure; ce dernier correspond à l'acide hyposulfureux.

Protochlorure de soufre. — Il est liquide, jaune, légèrement visqueux; il bout à 138 degrés, sa densité = 1,687. L'eau et l'alcool le décomposent en acide chlorhydrique et dépôt de soufre. Il est composé de 1 atome de chlore et de 1 atome de soufre; sa formule est SCl.

Bichlorure de soufre. — Il est liquide, rouge-grenat foncé, très-volatil à la température ordinaire, d'une odeur piquante et très-désagréable, d'une saveur très-forte. Il rougit la teinture de tournesol, ce qui lui a valu par quelques chimistes le nom d'acide chlorosulfurique. Sa pesanteur spécifique est de 1,620. Il bout à 64 degrés; à l'air, il répand des vapeurs très-épaisses : l'eau le décompose en se décomposant elle-même; de là résulte de l'acide chlorhydrique, de l'acide sulfureux et un peu d'acide sulfurique. Il est formé de 2 atomes de chlore et de 1 atome de soufre; sa formule est SCl^2.

DES COMBINAISONS DE L'IODE.

L'iode forme des combinaisons avec l'hydrogène, le soufre, le chlore et l'azote.

Combinaisons du chlore et de l'iode.

On connaît deux combinaisons de chlore et d'iode : le protochlorure et le perchlorure d'iode : ces deux corps se combinent avec dégagement de calorique. Le premier produit est liquide et constitue le protochlorure. Mais quand le chlore est en excès, on obtient un produit solide qui est le perchlorure d'iode.

Protochlorure d'iode. — Il est liquide, rouge-brun, plus pesant que l'eau, ayant l'aspect et les propriétés physiques du brome. Il se dissout dans l'eau sans altération.

Perchlorure d'iode. — Il est solide, cristallin, blanc-jaunâtre, très-volatil, d'une odeur irritante; il excite les larmes et suffoque quand on le respire. Il est composé de 3 atomes de chlore et de 1 atome d'iode : sa formule est ICl^3.

Combinaison de l'iode et de l'azote.

Iodure d'azote. — L'iode et l'azote ne se combinent qu'en une seule proportion, et cette combinaison se fait entre 3 atomes d'iode et 1 atome d'azote, d'où la formule AzI^3.

L'affinité de l'iode pour l'azote est très-faible : aussi ces deux corps ne s'unissent-ils qu'autant que l'azote est à l'état de gaz naissant.

L'iodure d'azote est pulvérulent, noirâtre, et fulmine fortement. Lorsqu'il est sec, la détonation est spontanée : aussi faut-il de grandes précautions pour le toucher.

COMBINAISONS DU BROME.

L'hydrogène, le silicium, le carbone, le phosphore, le soufre, l'iode et le chlore forment des combinaisons avec le brome; mais ces combinaisons sont si peu employées, que nous les passerons sous silence.

COMBINAISONS DU CHLORE.

Nous avons parlé des combinaisons que le chlore forme avec les métalloïdes; il ne nous reste à parler que de celles qu'il forme avec l'hydrogène et de l'azote.

Combinaison du chlore et de l'azote.

Chlorure d'azote. — On ne connaît qu'une seule combinaison de chlore et d'azote. Ce chlorure est liquide, oléagineux, d'une couleur fauve, d'une odeur très-piquante et insupportable. Sa saveur n'est pas connue. Sa pesanteur spécifique est plus grande que celle de l'eau. Chauffé, il se volatilise en formant une vapeur suffocante. Exposé à 30 degrés, il détone tout à coup avec violence en se décomposant. Le phosphore, le soufre et quelques métaux le décomposent.

COMBINAISONS DE L'AZOTE.

Toutes les combinaisons de l'azote avec les métalloïdes ont été données, à l'exception de celle qui a lieu avec l'hydrogène. Cette combinaison constitue l'ammoniaque que nous verrons bientôt.

DES COMBINAISONS DE L'OXYGÈNE AVEC LES MÉTALLOÏDES. — OXYDES ET ACIDES MÉTALLOÏDIQUES.

En combinant l'oxygène avec les métalloïdes, on obtient des composés qui ne possèdent pas de propriété basique; ils sont pour la plupart acides. On les connaît sous le nom d'*oxacides*.

Combinaisons de l'oxygène avec l'hydrogène.

L'hydrogène et l'oxygène se combinent en deux proportions pour former l'eau et le bioxyde d'hydrogène; mais ici nous ne traiterons que de l'eau.

De l'eau (protoxyde d'hydrogène). — L'eau est liquide à la température ordinaire, transparente, incolore, inodore, insipide, élastique, capable de transmettre les sons et de mouiller les corps. Sa pesanteur spécifique est l'unité à laquelle on compare le poids des liquides et des solides. Un litre d'eau à + 4 degrés pèse 1000 grammes. L'eau est un mauvais conducteur d'électricité ; elle réfracte fortement la lumière; soumise à l'action de la chaleur, elle s'échauffe et entre en ébullition à la température de 100 degrés sous la pression ordinaire. L'augmentation ou la diminution de pression retarde ou avance son point d'ébullition; les sels qui ont de l'affinité pour l'eau le retardent égale-

ment, tandis que quelques fils métalliques ou de verre l'avancent. L'eau se volatilise, et la vapeur qui en résulte occupe un volume 1700 fois plus considérable que celui qu'elle occupe à l'état liquide : comme celle de tous les gaz, la tension de sa vapeur augmente avec sa température. Exposée au froid, l'eau se condense jusqu'à + 4 degrés; au contraire, elle se dilate jusqu'au terme de la congélation qui a lieu à zéro. Pendant sa congélation, elle augmente d'un quatorzième de son volume, d'où il résulte que la glace est plus légère que l'eau.

L'oxygène se dissout en quantité d'autant plus grande que la température est plus basse et la pression plus forte. A + 10 degrés, pression ordinaire, elle en dissout plus de la vingt-cinquième partie de son volume.

L'air s'y dissout aussi, mais en moindre proportion, et l'on remarque que l'air y est plus riche en oxygène, ce qui tient uniquement à ce que l'azote est moins soluble que l'oxygène.

L'hydrogène ne se dissout qu'en petite quantité.

Parmi les métalloïdes, il n'y a que l'azote, l'iode, le brome et le chlore qui se dissolvent dans l'eau.

Le bore et le carbone ne la décomposent qu'à une température élevée, en donnant, le premier de l'acide borique et de l'hydrogène, le second de l'acide carbonique et du protocarbure d'hydrogène. L'iode chauffé avec elle la décompose et forme de l'acide iodhydrique et de l'acide iodique. Le chlore dissous dans l'eau constitue le chlore liquide.

Parmi les métaux, quelques-uns décomposent l'eau, tantôt à la température ordinaire, tantôt à une température un peu plus élevée, d'autres fois à une température rouge. Aucun n'y est soluble.

La plupart des acides se dissolvent dans l'eau; en général, ceux qui ont beaucoup de saveur y sont très-solubles.

L'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène et 1 volume d'oxygène, ou 2 atomes du premier et 1 atome du second = H^2O.

Acide borique. — Il est solide, blanc, inodore, rougissant faiblement la teinture de tournesol. Sa pesanteur spécifique = 1,803; soumis à une température élevée, il donne lieu à un verre incolore et transparent; en même temps il perd son eau de combinaison. L'air et l'oxygène ne l'altèrent pas. L'eau à 100 degrés n'en dissout que la trente-cinquième partie de son poids. Quoique l'acide borique soit un des acides les plus fixes, cependant il se volatilise dans l'eau bouillante; mais alors c'est la vapeur de l'eau qui détermine sa volatilisation. Il est formé de 2 atomes de bore et de 3 atomes d'oxygène, d'où B^2O^3.

Combinaisons du carbone et de l'oxygène.

Oxyde de carbone. — Ce corps est gazeux, incolore, insipide, sans action sur le tournesol, inflammable, éteignant les corps en combustion, et impropre à la respiration. L'air ou l'oxygène ne le transforment en acide carbonique qu'à l'aide de la chaleur ou de l'étincelle électrique, en produisant une détonation plus ou moins vive.

Le potassium et le sodium seuls le décomposent en devenant protoxydes et mettant à nu le carbone.

Le chlore et l'oxyde de carbone exposés au soleil en quantités égales se contractent de moitié et forment une nouvelle combinaison qu'on

nomme *acide chloroxycarbonique*. Il est incolore, d'une odeur analogue au chlorure d'azote, rougissant la teinture du tournesol et éteignant les corps en combustion. L'oxyde de carbone est composé de 2 atomes de carbone et 1 atome d'oxygène = C^2O.

Acide carbonique. — L'acide carbonique est incolore, d'une saveur légèrement aigre, d'une odeur un peu piquante; il ne rougit que très-peu la teinture du tournesol, éteint les corps en combustion, asphyxie promptement les animaux et pèse 1,52450. Il est plus pesant que l'air, aussi peut-on le transvaser comme un liquide. La plus forte chaleur ne le décompose pas. Il n'a aucune action chimique ni sur le gaz oxygène, ni sur l'air à une température quelconque; mais si on le soumet au choc d'une série d'étincelles électriques, il se transforme, en partie, en gaz oxygène et en gaz oxyde de carbone. L'acide carbonique n'est décomposé à froid par aucun combustible. Le potassium et le sodium décomposent le gaz acide carbonique, le premier avec dégagement de calorique et de lumière, et le second avec dégagement de calorique seulement.

L'eau dissout l'acide carbonique d'autant mieux qu'on opère à une pression plus forte : on peut arriver par ce moyen à l'en charger de cinq ou six fois son volume.

L'acide carbonique est facile à reconnaître au moyen de l'eau de chaux, qui est instantanément précipitée en blanc. Cet acide est formé de 1 atome de carbone et de 1 atome d'oxygène = CO.

Combinaisons du phosphore et de l'oxygène.

Oxyde de phosphore. — L'oxyde de phosphore est rouge, insipide, inodore, insoluble dans l'eau, l'alcool, l'éther et les huiles; il n'est pas lumineux dans l'obscurité; chauffé dans un tube fermé, il se décompose en acide phosphorique et en phosphore; si le tube avait le contact de l'air, il ne se formerait que de l'acide phosphorique.

Acides hypophosphoreux et phosphoreux. — Ces deux acides ont pour caractères communs d'être décomposables par la chaleur, et de donner lieu à de l'hydrogène protophosphoré, à du phosphore et à de l'acide phosphorique. Dans ce cas, l'eau est décomposée : son oxygène se porte sur l'acide qui, abandonné du phosphore, passe à l'état d'acide phosphorique; en même temps une partie du phosphore se volatilise, tandis que l'autre forme de l'hydrogène phosphoré par sa combinaison avec l'hydrogène de l'eau.

L'acide hypophosphoreux est liquide, incristallisable, très-sapide; les sels qu'il forme sont tous très-solubles. Il est formé de 4 atomes de phosphore et de 3 atomes d'oxygène = P^4O^3.

Acide phosphoreux. — Cet acide est solide, cristallisé, blanc, inodore et très-sapide. Il forme avec les bases, des sels qui sont en général moins solubles que les hypophosphites; quelques-uns même ne le sont pas. Il est formé de 2 atomes de phosphore et de 3 atomes d'oxygène = P^2O^3.

Acide hypophosphorique ou phosphatique. — Cet acide paraît n'être qu'un composé d'acide phosphoré et d'acide phosphorique dans la proportion de 1 atome du premier et de 2 atomes du second, d'où la formule P^6O^{13}. Ce qu'il y a de certain, c'est que cet acide, combiné avec les bases, donne lieu à des phosphates et à des phosphites.

Cet acide est toujours liquide, visqueux, incolore, très-sapide, d'une odeur faible de phosphore, d'une densité plus grande que celle de l'eau. Exposé à la chaleur, il se décompose de la même manière que les deux acides précédents. L'eau le dissout en toutes proportions.

Acide phosphorique. — Cet acide est solide, très-acide, inodore, incolore, rougissant fortement la teinture du tournesol, d'une pesanteur spécifique plus grande que celle de l'eau; il peut cristalliser, mais difficilement. Exposé à une chaleur rouge, il fond et donne lieu à un verre transparent; à une température très-élevée, il se vaporise; exposé à l'action de la pile, il est décomposé en phosphore et en oxygène.

L'air et l'oxygène n'ont aucune action sur l'acide phosphorique, si ce n'est quand ils sont humides : alors l'acide absorbe leur humidité. L'eau dissout facilement l'acide phosphorique; cette dissolution est appelée *acide phosphorique liquide.* L'alcool le dissout également.

Quand on brûle du phosphore dans de l'oxygène sec, on obtient de l'acide phosphorique anhydre P^2O^5. Cet acide dissous dans l'eau s'hydrate immédiatement et forme un composé contenant 1 atome d'eau $= P^2O^5 + H^2O$. Cet acide possède la propriété de précipiter l'albumine en si petite quantité, qu'il devient un excellent réactif pour déceler la présence de ce corps. Si l'on abandonne la dissolution, au bout de quelque temps l'acide a absorbé 3 atomes d'eau et est devenu $P^2O^5 + H^6O^3$. C'est là l'acide phosphorique ordinaire, qui, au lieu de précipiter l'albumime, la dissout quand elle est coagulée.

Combinaisons du soufre avec l'oxygène.

Acide hyposulfureux. — Cet acide avait été considéré comme ne pouvant exister qu'à l'état de combinaison; on peut l'obtenir cependant en décomposant l'hyposulfite de plomb par l'hydrogène sulfuré. Sa saveur est très-acide et amère, mais il ne ronge pas comme l'acide sulfurique; il attire l'humidité de l'air; à 80 degrés il se décompose en soufre et acide sulfureux. Il est formé de 1 atome de soufre et de 1 atome d'oxygène $= SO$.

Acide sulfureux. — C'est un gaz invisible, d'une saveur forte et désagréable, d'une odeur piquante qui excite la toux, resserre la poitrine et suffoque les animaux qui le respirent. Il rougit d'abord la teinture de tournesol, puis la jaunit; sa pesanteur spécifique est de 2,234. La plus forte chaleur ne le décompose pas, le froid le liquéfie facilement; alors il est incolore, transparent, très-volatil et bouillant à —10 degrés. En se volatilisant il produit un froid tel, qu'il peut solidifier le mercure, liquéfier le chlore, l'ammoniaque, le cyanogène. L'oxygène n'a aucune action sur lui. L'hydrogène et le carbone le décomposent à une température élevée : il résulte dans le premier cas de l'eau et du soufre, et de l'hydrogène sulfuré si l'hydrogène est en excès; dans le second cas il y a dépôt de soufre et formation d'acide carbonique ou d'oxyde de carbone; le chlore liquide le transforme en acide sulfurique.

Le potassium et le sodium décomposent ce gaz à froid, mais l'action est lente, tandis que par une légère élévation de température la décomposition se fait plus vite; il est composé de 1 atome de soufre et de 2 atomes d'oxygène $= SO^2$

Acide hyposulfurique. — Il est liquide, incolore, inodore, susceptible de se décomposer par la chaleur en acide sulfureux et sulfurique. Il ne peut exister sans eau; car si on le concentre trop dans le vide, il se décompose également comme par la chaleur. Il est composé de 2 atomes de soufre, de 5 atomes d'oxygène $= S^2O^5$.

Acide hyposulfurique sulfuré. — Cet acide se distingue des autres acides du soufre par la propriété qu'il a de se changer par la chaleur en acide sulfureux, acide sulfurique et soufre. Il est formé de 3 atomes de soufre et de 5 d'oxygène $= S^3O^5$, ou bien $SO^3 + SO^2 + S$, forme qui rend compte de sa décomposition.

Acide sulfurique sec ou anhydre. — Cet acide au-dessous de 25 degrés est solide, blanc, opaque, se fondant à 25 degrés, et formant alors un liquide qui réfracte fortement la lumière et qui, refroidi lentement, se prend en houppes soyeuses. Quelques degrés au-dessus de 25 suffisent pour le volatiliser. Il est caustique, rougit fortement la teinture du tournesol; sa pesanteur spécifique $= 1,57$. Il a beaucoup d'affinité pour l'eau; mis en contact avec elle, il s'y combine en produisant une forte chaleur. Il est composé de 1 atome de soufre et de 3 atomes d'oxygène $= SO^3$.

Acide sulfurique hydraté. — Cet acide est toujours liquide, blanc, inodore, d'une consistance oléagineuse, rougissant le tournesol; sa densité est de 1,842. C'est un des plus violents caustiques; il désorganise sur-le-champ les matières animales et végétales que l'on met en contact avec lui; aussi est-il un poison des plus énergiques. Et comme cet acide liquide le plus concentré contient 1 atome d'eau, sa formule devient SO^3, H^2O.

Combinaisons de l'iode et de l'oxygène.

Acide iodique. — Cet acide est solide, blanc, inodore, d'une saveur aigre et astringente, rougissant le tournesol, qu'il détruit ensuite; plus pesant que l'acide sulfurique. La chaleur le décompose en oxygène et en iode. Il brûle avec détonation la plupart des métalloïdes. Les acides peu oxygénés le décomposent en passant à un degré plus avancé d'oxygénation; à l'air humide, il tombe en déliquescence; il est donc très-soluble dans l'eau. Il est formé de 2 atomes d'iode et de 5 atomes d'oxygène $= I^2O^5$.

Acide hyperiodique. — Il correspond à l'acide perchlorique; il est formé comme lui de 2 atomes d'iode et de 7 atomes d'oxygène $= I^2O^7$.

Combinaisons du chlore avec l'oxygène.

Acide hypochloreux. — Cet acide est un gaz d'un jaune un peu plus foncé que le chlore, d'une odeur vive et pénétrante; exposé à la lumière solaire, il se décompose sans détonation; une lumière diffuse ne l'altère pas. Soumis à une chaleur élevée, il détone en produisant une vive lumière. Presque tous les métalloïdes le décomposent: l'hydrogène à chaud, le carbone à froid et avec détonation; il en est de même du soufre, du phosphore, de l'arsenic, etc. Presque tous les métaux le décomposent, les uns avec détonation et les autres sans détonation, mais toujours il se forme un chlorure et un oxyde. L'eau dissout abondamment cet acide; c'est l'un des oxygénants les plus

énergiques : c'est pourquoi il agit si vivement sur les couleurs végétales ; il est formé de 2 atomes de chlorure et de 1 atome d'oxygène = Cl^2O.

Acide chloreux. — Il est gazeux, jaune-verdâtre assez foncé, très-irritant ; il décolore le tournesol et le sulfate d'indigo. Il communique à l'eau qui en contient cinq à six fois son volume une couleur jaune d'or; la plupart des métalloïdes le font détoner : il est formé de 2 atomes de chlore et de 3 atomes d'oxygène = Cl^2O^3.

Acide chlorique. — Cet acide est liquide, incolore, inodore, d'une saveur très-acide; il rougit le tournesol, puis il finit par le décolorer; il peut être concentré sans décomposition. Si on le concentre suffisamment pour qu'il prenne une teinte jaunâtre, il possède alors la propriété de décomposer l'alcool, en lui enlevant de l'hydrogène et le transformant en acide acétique; il agit de la même manière sur l'éther. Il est formé de 2 atomes de chlore et de 5 atomes d'oxygène = Cl^2O^5.

Acide hyperchlorique. — Il est liquide, incolore, inodore, rougissant le tournesol sans le détruire. Exposé à une douce chaleur, il perd l'excès d'eau qu'il peut contenir, et se volatilise sans décomposition à 140 degrés; il contient 7 atomes d'oxygène pour 2 atomes de chlore = Cl^2O^7.

Combinaisons de l'azote et de l'oxygène.

Protoxyde d'azote. — Ce gaz est incolore, inodore, d'une saveur un peu sucrée; sa densité = 1,5269. Comprimé et refroidi en même temps, il se liquéfie. Ce gaz entretient bien la combustion et allume les bougies qui présentent quelques points en ignition; il est composé de 2 atomes d'azote et de 1 atome d'oxygène = Az^2O.

Bioxyde d'azote. — Ce gaz est incolore, sans action sur le tournesol; son odeur et sa saveur ne peuvent pas être connus, car aussitôt qu'il est mis en contact avec l'air, il passe à l'état d'acide hypo-azotique. Il éteint les corps en combustion et asphyxie les animaux qui le respirent. Sa pesanteur spécifique est de 1,0390; il est formé de 2 atomes d'azotes et de 3 atomes d'oxygène = Az^2O^3.

Acide azoteux. — Cet acide ne peut être isolé, car sa propriété est de se décomposer en bioxyde d'azote et en acide hypo-azotique; il est formé de 2 atomes d'azote et de 3 atomes d'oxygène = Az^2O^3.

Acide hypo-azotique. — A la température et à la pression ordinaires cet acide est liquide, d'une couleur qui varie avec la température; d'un jaune orangé de 15 à 28 degrés, d'un jaune fauve à 0 degré, presque incolore à — 10 degrés, et tout à fait incolore à — 20 degrés. Il possède une saveur caustique, une odeur très-forte, caractéristique, et une densité = 1,451. Il rougit fortement le tournesol, tache la peau en jaune et la désorganise. Il est composé de 2 atomes d'azote et de 4 atomes d'oxygène = Az^2O^4.

Acide azotique — L'acide azotique le plus concentré est liquide, blanc, odorant, très-acide et corrosif. Il tache la peau en jaune et la désorganise, ce qui en fait un des plus violents poisons. Sa pesanteur spécifique = 1,554. Cet acide résulte de la combinaison de 2 atomes d'azote et de 5 atomes d'oxygène = Az^2O^5; mais comme le plus concentré contient toujours 1 atome d'eau, sa formule devient $Az^2O^5 + H^2O$.

DES HYDRACIDES.

Les hydracides sont des combinaisons dans lesquelles l'hydrogène se trouve en proportion telle, qu'en s'unissant à l'oxygène d'un oxyde il se forme juste de l'eau et un nouveau composé que l'on nomme *sel haloïde*. Pour bien concevoir cette théorie, prenons la combinaison de l'acide chlorydrique avec un oxyde; nous avons :

ACIDE CHLORHYDRIQUE FORMÉ DE		OXYDE FORMÉ DE
2 at. d'hydrogène	uni à	1 at. d'oxygène = 1 at. d'eau,
2 at. de chlore		1 at. de métal = 1 at. de chlorure.

Cette théorie s'applique à tous les autres hydracides.

DES MÉTAUX.

Les métaux sont des corps simples, presque complétement opaques, très-brillants en masse, brillants même en poussière, pourvu qu'elle ne soit pas trop ténue, doués de la propriété de recevoir un beau poli et de prendre un éclat très-vif, bons conducteurs du calorique, transmettant le fluide électrique avec une rapidité extrême, capables de se combiner en diverses proportions avec l'oxygène, et de donner naissance à des oxydes qui sont ternes, et qui, pour la plupart, peuvent former des sels plus ou moins neutres avec les acides.

Classification des métaux. — Nous classerons les métaux en six sections, fondées sur l'affinité que ces corps ont pour l'oxygène.

1re SECTION. — Les métaux qui n'ont point encore pu être réduits, et qui ne sont admis au rang des métaux que par analogie, ou parce que les matières dont nous les extrayons ont les plus grands rapports avec les oxydes métalliques; ils sont au nombre de sept, savoir :

Le magnésium,
Le glucynium,
L'yttrium,
L'aluminium,
Le thorinium,
Le zirconium,
Le silicium.

2e SECTION. — Les métaux qui ont la propriété d'absorber le gaz oxygène à la température la plus élevée, et de décomposer subitement l'eau à la température ordinaire, en s'emparant de son oxygène et en dégageant son hydrogène avec une vive effervescence; ils sont au nombre de six, savoir :

Le calcium,
Le strontium,
Le barium,
Le lithium,
Le sodium,
Le potassium.

3e SECTION. — Les métaux qui ont la propriété d'absorber le gaz oxygène à la température la plus élevée, comme ceux des deux premières sections, mais de ne décomposer l'eau qu'à l'aide de la chaleur rouge; ils sont au nombre de cinq, savoir :

Le manganèse,
Le zinc,
Le fer,
L'étain,
Le cadmium.

4e SECTION. — Les métaux qui, comme les précédents, peuvent absorber le gaz oxygène à la température la plus élevée, mais qui ne décomposent l'eau ni à froid ni à chaud ; ils sont au nombre de quinze, savoir :

L'arsenic,	L'antimoine,	Le bismuth,
Le molybdène,	L'urane,	Le cuivre,
Le chrome,	Le cérium,	Le tellure,
Le tungstène,	Le cobalt,	Le nickel,
Le colombium,	Le titane,	Le plomb.

5e SECTION. — Les métaux qui ne peuvent absorber le gaz oxygène qu'à un certain degré de chaleur, et qui ne peuvent point opérer la décomposition de l'eau : leurs oxydes se réduisent nécessairement à une température élevée ; ils sont au nombre de deux seulement, savoir :

Le mercure,
L'osmium.

6e SECTION. — Les métaux qui ne peuvent absorber le gaz oxygène et décomposer l'eau à aucune température, et dont les oxydes se réduisent au-dessous de la chaleur rouge ; ces métaux sont au nombre de six, savoir :

L'argent,	Le platine,
Le palladium,	L'or,
Le rhodium,	L'iridium.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MÉTAUX.

État. — Tous les métaux sont solides à la température ordinaire, excepté le mercure, qui ne se solidifie qu'à — 40 degrés.

Couleur. — Les métaux sont différemment colorés : l'or est jaune ; le cuivre et le titane sont rouges ; presque tous les autres sont plus ou moins blancs.

Éclat. — On appelle *éclat métallique* un brillant très-vif particulier aux métaux, même réduits en poussière. Cet éclat dépend de la propriété que ces corps ont de réfléchir une très-grande quantité de lumière. Les plus éclatants sont l'or, l'argent, le platine, le fer à l'état d'acier, le cuivre, etc.

Opacité. — Les métaux sont presque complétement opaques : cependant, comme il est certain qu'une feuille d'or très-mince laisse passer quelques rayons lumineux, et que l'or est le plus dense des métaux après le platine, il est permis de croire qu'aucun métal n'est parfaitement opaque.

Densité. — La densité des métaux est très-variable : le platine, qui est le plus dense, pèse, lorsqu'il est forgé, plus de 22 fois autant que l'eau distillée, tandis que le potassium, qui est le plus léger, a une pesanteur spécifique moindre qu'elle.

Ductilité. — La ductilité est la propriété qu'ont certains métaux de se réduire en fils en passant à la filière et de se réduire en lames sous le choc du marteau, ou la pression du laminoir.

Ténacité. — On entend par ténacité la propriété qu'ont les métaux

ductiles, réduits en fils d'un petit diamètre, de supporter un certain poids sans se rompre; elle est d'autant plus grande que ce poids est plus considérable.

Dureté. — Il existe entre les métaux une très-grande différence sous le rapport de leur dureté; il en est qui rayent presque tous les corps : tel est le fer, etc.; il en est d'autres, au contraire, que presque tous les autres rayent : tel est le plomb qu'on entame avec l'ongle; tels sont le potassium, le sodium, qui ont la consistance de la cire.

Élasticité et sonorité. — Les métaux sont en général d'autant plus élastiques et sonores qu'ils ont plus de dureté : aussi augmente-t-on l'élasticité et la sonorité de ces corps en les combinant avec d'autres corps qui les rendent plus durs sans en détruire le caractère métallique. Tel est l'acier trempé ou une combinaison de fer et de charbon; tel est encore le métal de cloche ou alliage de cuivre et d'étain.

Dilatabilité. — Tous les métaux éprouvés jusqu'ici sont plus dilatables que les autres solides. Chacun se dilate sensiblement, d'une manière uniforme, depuis 0 jusqu'à 100 degrés; au delà, cette uniformité de dilatation n'a plus lieu.

Odeur et saveur. — Plusieurs métaux ont une saveur et une odeur désagréables qui se développent surtout par le frottement : tels sont le fer, le plomb, le cuivre et l'étain. L'or, l'argent et le platine ne sont pas doués de ces propriétés.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES MÉTAUX.

Action du feu. — La fusibilité des métaux est très-variable. Les uns fondent au-dessous de la chaleur rouge; plusieurs autres un peu au-dessus de ce degré; un certain nombre n'entre en fusion qu'à une température très-élevée; d'autres enfin sont presque infusibles. Le feu d'un fourneau ordinaire suffit pour fondre les premiers; les seconds exigent un feu de réverbère; les troisièmes un feu de forge; les derniers ne cèdent qu'au feu que produisent l'oxygène et le charbon, ou l'oxygène et l'hydrogène.

Lorsque les métaux sont fondus, qu'on les laisse refroidir, qu'on perce la croûte qui est à la surface, et qu'on décante les parties intérieures qui sont encore liquides, on les obtient cristallisés; les formes qu'ils affectent sont le cube et l'octaèdre. Celui qui cristallise le plus facilement est le bismuth bien pur, et surtout privé d'arsenic. Ses cristaux sont cubiques et se disposent de manière à former des pyramides quadrangulaires creuses.

Lorsque, au lieu d'exposer les métaux à une température capable de les fondre, on les expose à une température bien plus élevée, plusieurs se volatilisent : tels sont le mercure, l'arsenic, le cadmium, le potassium, le tellure et le zinc.

Action du fluide électrique. — Les métaux sont d'excellents conducteurs de l'électricité. Tant que leur surface suffit à l'écoulement du fluide électrique, ils n'éprouvent aucune altération; mais lorsqu'elle n'est pas suffisante, ce fluide pénètre dans leur intérieur, les échauffe, et parvient même à les fondre et à les volatiliser.

Action du gaz oxygène. — Le gaz oxygène sec, à la température ordinaire, est absorbé par le potassium; d'où l'on peut croire qu'il le

serait également par le barium, le lithium, le strontium, le calcium, et par les métaux de la première section; mais il ne l'est à cette température, ni par le sodium, ni par aucun des métaux appartenant aux quatre dernières sections. Un certain degré de chaleur favorise singulièrement son action : aussi, par ce moyen, agit-il sur tous les métaux, ceux de la dernière section exceptés. Un grand nombre l'absorbe même à une température suffisamment élevée, en donnant lieu à un dégagement de lumière, savoir : les métaux de la seconde section; le zinc, le fer, l'étain et le cadmium de la troisième; l'arsenic, l'antimoine, le tellure, le bismuth de la quatrième. L'étain, l'antimoine et le bismuth sont ceux dont la combustion est la plus faible.

Action du gaz oxygène humide. — Le gaz oxygène humide n'attaque pas seulement les métaux des deux premières sections, il attaque encore plusieurs de ceux qui appartiennent à la troisième, à la quatrième, et même à la cinquième section. Dans le premier cas, le métal s'oxyde tout à la fois par l'oxygène libre et par l'oxygène de l'eau; celle-ci est décomposée, et l'hydrogène qu'elle contient se dégage. Dans le second cas, le métal ne s'oxyde que par l'oxygène libre; alors on suppose que la vapeur d'eau agit doublement : que, d'une part, en se liquéfiant en partie par les changements de température qui surviennent, elle dissout une certaine quantité de gaz oxygène et le rend capable, en lui faisant perdre son état élastique, de se combiner avec le métal, et que, de l'autre, elle favorise encore cette union par sa tendance à s'unir elle-même avec l'oxyde métallique et à former un composé connu sous le nom d'*hydrate*.

Lorsque l'oxygène sec ou humide contient de l'azote, son action sur les métaux est encore la même que quand il n'en contient pas, si ce n'est qu'elle est moins intense; car l'azote n'agit que mécaniquement ou ne fait que diminuer les points de contact entre l'oxygène et les métaux. Or, comme l'air est composé de 21 d'oxygène, de 79 d'azote, d'un peu de vapeur d'eau et d'un peu d'acide carbonique, il doit agir sur les métaux de la même manière que l'oxygène, à l'intensité près, et c'est en effet ce qui a lieu : sec, il n'attaque à la température ordinaire que ceux des deux premières sections, et encore même n'a-t-il pas d'action sur le sodium : humide, il attaque non-seulement ceux-ci à cette température, mais encore plusieurs de ceux de la troisième, quatrième et cinquième section : sec ou humide, il les attaque tous à l'aide d'une chaleur convenable, excepté ceux de la dernière section. Le résultat de cette action est un *oxyde* ou un *hydrate*.

État naturel. — Les métaux ne se rencontrent que rarement natifs, c'est-à-dire à l'état de pureté dans la nature. Presque toujours ils sont combinés avec d'autres corps : tantôt avec l'oxygène, tantôt avec les corps combustibles, tantôt avec l'oxygène et un acide ou à l'état de sels. Ils existent donc naturellement sous quatre états principaux. Le même métal se trouve souvent sous les trois derniers ou sous deux d'entre eux, et quelquefois seulement sous les quatre ou sous un seul; dans tous les cas, le minerai ou mine métallique est enveloppé d'une couche de pierre qu'on appelle *gangue* et qui est le plus ordinairement formée de quartz, de carbonate de chaux, de fluate de chaux et de sulfate de baryte.

Ce ne sont ordinairement que les métaux qui ont peu d'affinité pour l'oxygène que l'on rencontre natifs : tels sont l'or et l'argent. Ce sont, au contraire, ceux dont l'affinité pour l'oxygène est grande ou du moins assez grande pour l'absorber à une température élevée, que l'on trouve à l'état d'oxyde ; il est vrai que souvent l'oxyde est combiné avec un acide.

MÉTAUX DE LA 1re SECTION.

La première section comprend les métaux qui n'ont point encore pu être réduits ; ces métaux sont au nombre de sept : le silicium, le zirconium, le thorinium, l'aluminium, l'yttrium, le glucinium, le magnésium. Ils ne se trouvent jamais qu'à l'état d'oxydes purs, ou unis soit à d'autres oxydes, soit à des acides ; leurs oxydes prennent le nom générique de *terres;* on peut donc les désigner par cette expression : *métaux des terres.*

MÉTAUX DE LA 2e SECTION OU MÉTAUX ALCALINS.

Les métaux de la deuxième section sont ceux qui décomposent subitement l'eau à la température ordinaire, qui absorbent le gaz oxygène à cette même température, et dont les oxydes sont réductibles par l'électricité et irréductibles par la chaleur seule. Ces métaux sont au nombre de six : le calcium, le strontium, le barium, le lithium, le sodium et le potassium. Unis avec l'oxygène, ils donnent naissance à des oxydes que l'on connaissait sous le nom d'alcalis ; de là le nom de *métaux alcalins.*

Potassium. — Ce métal est solide à la température ordinaire. Il a l'éclat métallique au plus haut degré. Récemment fondu dans l'huile de naphte, et vu dans cette huile à travers le verre, il ressemble à l'argent mat ; lorsqu'on le retire, il se ternit bientôt et prend l'aspect du plomb exposé depuis longtemps à l'air. Sa section est lisse, unie et des plus brillantes ; il est ductile et mou comme la cire. Sa pesanteur spécifique est de 0,865 à la température de 15 degrés ; conséquemment elle est moindre que celle de l'eau. Le potassium entre en fusion à 58 degrés : c'est donc le métal le plus fusible après le mercure ; et si la chaleur est plus forte, il se volatilise en produisant une vapeur verte.

Sodium. — Le sodium est inodore, presque aussi ductile et presque aussi mou que la cire ; il a une couleur analogue à celle du plomb ; sa section est unie et très-brillante ; sa pesanteur spécifique = 0,972. Il fond à 90 degrés et ne se volatilise pas.

Lithium, Barium, Strontium, Calcium. — Ces quatre corps ont la plus grande analogie de propriétés. Comme ils sont entièrement inusités, nous les passerons sous silence.

MÉTAUX DE LA 3e SECTION.

Les métaux de la troisième section sont ceux qui ne décomposent l'eau qu'au degré de la chaleur rouge, qui absorbent le gaz oxygène à une température plus ou moins élevée, et dont les oxydes sont réductibles par l'électricité et irréductibles par la chaleur la plus forte

que l'on ait pu produire. Ces métaux sont au nombre de cinq : le manganèse, le zinc, le fer, l'étain et le cadmium.

Manganèse. — Ce métal est solide, très-cassant, très-dur, grenu, d'une couleur *gris-blanc;* sa pesanteur spécifique est de 6,85 ; il fond à 160 degrés du pyromètre de Wedgwood, non volatil, se combinant facilement avec l'oxygène à plusieurs proportions.

Fer. — Il est solide, dur, à gros grains, acquérant par le frottement une odeur sensible; très-ductile, il passe mieux à la filière qu'au laminoir; sa ténacité est extrême; sa pesanteur spécifique = 7,788; il fond à 130 degrés du pyromètre de Wedgwood; il est attirable à l'aimant et peut même s'aimanter. C'est l'un des métaux les plus combustibles; car, porté au rouge, puis mis en contact avec l'oxygène, il brûle entièrement et se convertit en oxydes qui apparaissent sous forme d'aigrettes lumineuses. Ce métal s'oxyde lui-même à la température ordinaire, quand l'oxygène ou l'air sont un peu humides; l'oxyde qui se forme porte vulgairement le nom de *rouille.*

Acier. — L'acier dont on se sert pour fabriquer une foule d'instruments, de machines et les armes blanches, n'est autre chose que du fer contenant, à l'état de combinaison, 1 à 2 pour 100 de carbone; et 1 à 6 millièmes de silicium; il peut encore contenir de l'aluminium et quelques traces de manganèse. L'acier est très-brillant, susceptible d'un beau poli, très-ductile et très-malléable; son tissu est grenu, à grains fins et serrés. Sa pesanteur spécifique est moindre que celle du fer. Quand on le chauffe et qu'on le refroidit brusquement, il devient très-dur et très-cassant : c'est ce que l'on nomme *acier trempé.*

Zinc. — Le zinc est solide, blanc-bleuâtre, lamelleux, très-ductile; il passe beaucoup mieux au laminoir qu'à la filière; on ne l'a point encore obtenu cristallisé, car il est difficile de l'avoir autrement qu'en lames dont la forme est irrégulière; sa densité est faible; sa pesanteur spécifique est de 7,1. Il entre en fusion au-dessous de la chaleur rouge et se volatilise au-dessus de cette température. Il se trouve sous trois états dans la nature : à l'état d'oxyde, à l'état de sulfure et à l'état de sel. L'oxyde est connu sous le nom de *calamine,* et le sulfure sous le nom de *blende.* Le zinc s'emploie dans un assez grand nombre de circonstances : appliqué en lames sur le cuivre, il constitue les éléments de la pile voltaïque; combiné avec l'étain et le mercure, il forme un amalgame dont on frotte les coussins des machines électriques Il entre pour un quart dans la composition du laiton ou du cuivre jaune; il fait partie du sulfate ou vitriol blanc de zinc; enfin on s'en sert pour faire des conduits, des gouttières, des bassins, des baignoires, des couvertures de toits, des ponts, etc.

Étain. — L'étain est fort peu répandu, il ne se trouve que dans un petit nombre de pays. Les mines les plus belles d'étain appartiennent à l'Inde, à l'Angleterre, à l'Allemagne, etc. La France n'en possède malheureusement aucune assez riche pour être exploitée. L'étain est solide, presque aussi blanc que l'argent; il s'étend bien en lames et se tire mal en fils; il a beaucoup plus de dureté et d'éclat que le plomb; sa pesanteur spécifique est de 7,291. On ne l'a point obtenu en cristaux réguliers; quoique fusible à 210 degrés, il

n'est point volatil. A la température ordinaire, il n'a sensiblement d'action ni sur le gaz oxygène, ni sur l'air sec; il n'agit même pas sur ces gaz humides, ou du moins il les attaque à peine: c'est pourquoi il conserve presque tout son brillant métallique dans son contact avec l'atmosphère. L'étain se trouve sous deux états dans la nature, à l'état d'oxyde et à l'état de sulfure. Quelques minéralogistes ont prétendu l'avoir trouvé à l'état natif, mais on a regardé cet étain comme un produit de l'art, enfoui depuis longtemps dans la terre.

Ses usages. — Les usages de l'étain sont très-multipliés. Combiné avec le cuivre, il forme l'alliage des canons et des cloches; uni avec deux fois son poids de plomb, il constitue la soudure des plombiers; réduit en feuilles minces et allié au mercure, il sert à mettre les glaces au *tain*. C'est en recouvrant la tôle d'étain qu'on obtient le fer-blanc; c'est en le traitant par un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique que l'on prépare l'hydrochlorate d'étain qui est employé surtout dans la teinture écarlate.

Cadmium. — Le cadmium est presque aussi blanc que l'étain, sans odeur, sans saveur, très-brillant, susceptible d'un beau poli; il tache les corps contre lesquels on le frotte; se laisse facilement entamer par le couteau, et présente à sa surface, en passant de l'état liquide à l'état solide, une cristallisation confuse. Ses cristaux sont des octaèdres; sa texture est compacte; sa ductilité est assez grande pour qu'on puisse le tirer en fils de petit diamètre et en obtenir des feuilles très-minces; sa densité est de 8,640, à la température de 16 degrés. Soumis à la chaleur, il fond avant de rougir, et même se réduit, au-dessous de cette température, en une vapeur inodore qui se condense dans le col du vase en gouttelettes brillantes et cristallines; à froid, il est sans action sur le gaz oxygène et sur l'air; mais lorsqu'on le chauffe convenablement, en contact avec l'un d'eux, il brûle avec la lumière et produit un oxyde qui paraît sous la forme d'une fumée jaune-brunâtre. Cet oxyde est le seul que le métal puisse former

Ce métal est très-rare; ce qui fait qu'il est sans usages.

MÉTAUX DE LA 4e SECTION.

Les métaux de la quatrième section sont ceux qui ne décomposent l'eau ni à froid ni à chaud, qui absorbent le gaz oxygène à une température plus ou moins élevée, et dont les oxydes sont réductibles par l'électricité et divers corps combustibles, et irréductibles par la chaleur seule. On les partage en deux parties : 1° ceux qui sont capables de s'acidifier; 2° ceux qui ne peuvent former que des oxydes. Les premiers sont au nombre de cinq : l'arsenic, le molybdène, le chrome, le tungstène et le colombium. Les seconds sont au nombre de dix : l'antimoine, l'urane, le cérium, le cobalt, le titane, le bismuth, le cuivre, le tellure, le nickel et le plomb.

Arsenic. — L'arsenic est solide, gris d'acier, fragile, brillant lorsque sa cassure est récente, terne lorsqu'elle est ancienne. Sa texture est grenue et écailleuse; frotté entre les mains, il leur communique une odeur sensible; il n'a point de saveur; sa pesanteur spécifique est de 8,308. C'est un poison dont on ne saurait trop se défier. Soumis

à une chaleur de 180 degrés sous la pression atmosphérique, l'arsenic se sublime lentement sans se fondre et cristallise en tétraèdres.

L'arsenic est un des métaux qui se rencontrent sous quatre états dans la nature, à l'état natif, à l'état d'oxyde, à l'état de combinaison binaire avec le soufre et plusieurs métaux, à l'état d'arséniate.

L'usage de l'arsenic est très-borné. Uni au platine, à l'étain et au cuivre, il forme un alliage propre à faire des miroirs de télescope. Mis en poudre sur une assiette et couvert d'eau, il sert à tuer les mouches. On s'en est servi pour fondre le platine et le mettre en lingots. Enfin, en le traitant par l'acide nitrique, on se procure l'arséniate de cobalt, qui s'emploie quelquefois dans les fabriques de porcelaine pour faire le beau bleu d'azur.

Molybdène. — Le molybdène est solide, fixe, cassant. Comme on n'a pu encore l'obtenir qu'en petits grains, on n'est pas d'accord sur sa couleur, et l'on ignore s'il possède le brillant métallique à un haut degré. Sa pesanteur spécifique est de 7,400; il résiste au feu des meilleures forges. Lorsqu'on le fait rougir à l'air libre, il se convertit en un acide blanc qui se sublime; il suit de là qu'à la température rouge il peut absorber le gaz hydrogène et donner naissance à cet acide.

Le molybdène ne se trouve qu'à l'état de sulfure, et qu'uni avec l'oxygène et le plomb dans le molybdate de plomb. Ces deux mines sont très-rares.

Chrome. — Ce métal est remarquable par la propriété qu'il a de former, avec presque tous les corps, des composés colorés, dont quelques-uns sont employés avec un grand succès en peinture et sur porcelaine. Le chrome est solide, fragile, d'un blanc grisâtre. Comme il est très-difficile à fondre, on ne l'a encore obtenu qu'en masse poreuse, formée en certains points de grains serrés, et en d'autres d'aiguilles cristallisées qui se croisent en tous sens. Sa pesanteur spécifique est inconnue. Il ne se trouve qu'à l'état de chromate et qu'à l'état d'oxyde; tantôt pur, tantôt combiné avec l'oxyde de fer. C'est de l'oxyde de chrome qu'on extrait le chrome, en calcinant cet oxyde avec le charbon à une très-haute température. Ce métal est sans usages et difficile à traiter.

Tungstène. — Ce métal est solide, très-dur, à peine attaquable par la lime, cassant, brillant, blanc-grisâtre comme le fer; il est presque aussi difficile à fondre que le molybdène. Sa pesanteur spécifique est de 17,60. Il résiste au feu de nos meilleures forges, lorsqu'on le chauffe jusqu'au rouge; à l'air libre, il s'oxyde et devient brun; à une température élevée, il absorbe le gaz oxygène. On le trouve à l'état de tungstate de chaux et de tungstate de fer. Le tungstate de chaux est très-rare, celui de fer l'est moins; c'est de celui-ci que le tungstène s'extrait. Ce métal est sans usages.

Colombium. — Ce métal est d'un gris foncé; il raye le verre; frotté sur une pierre fine à aiguiser, il prend un éclat métallique très-marqué, et ressemble alors au fer; en le réduisant en poudre, il devient terne et très-brun. Le plus violent feu de forge ne fait que l'agglutiner; aussi est-il toujours poreux, et ne peut-on point en déterminer la densité. A la température de l'atmosphère, il n'a

aucune action ni sur le gaz oxygène ni sur l'air sec; toutefois, lorsqu'on le chauffe jusqu'au rouge à l'air libre, il s'embrase, brûle facilement sans flamme, absorbe quelques centièmes d'oxygène, et se change en une poudre d'un blanc grisâtre. Il ne se trouve qu'à l'état d'acide, tantôt combiné avec un peu d'oxyde de fer et de manganèse, tantôt avec de l'oxyde d'yttrium ou de l'yttria. Ces minerais sont rares.

Antimoine. — L'antimoine est solide, blanc-bleuâtre, très-brillant, très-cassant, facile à réduire en poudre; frotté entre les doigts, il leur communique une odeur sensible; sa texture est lamelleuse; on peut l'obtenir cristallisé en cubes. Sa pesanteur spécifique est de 6,7021. Il existe sous quatre états : à l'état natif, à l'état d'oxyde, très-souvent à l'état de sulfure, enfin rarement à l'état d'oxyde sulfuré. L'antimoine est employé dans les arts pour faire, en le combinant avec environ quatre fois son poids de plomb, l'alliage des caractères d'imprimerie; il sert, en pharmacie, à préparer, 1° le beurre ou le chlorure d'antimoine; 2° l'oxyde antimonial; 3° l'antimoine diaphorétique ou l'antimoine de potasse.

Urane. — L'urane est solide, gris foncé, très-brillant, cassant, facilement attaqué par la lime. Sa pesanteur spécifique est de 8,7. L'urane, exposé à nos plus violents feux de forge, éprouve à peine un commencement de fusion; à la température ordinaire, il n'a aucune action ni sur le gaz oxygène, ni sur l'air secs; on ne sait pas s'il en a sur ces gaz humides. Lorsqu'on le chauffe jusqu'au rouge, à l'air libre, il s'embrase et passe à l'état d'un oxyde qui est noirâtre. L'urane ne se trouve qu'en petite quantité dans la nature; il y est toujours à l'état de protoxyde et de peroxyde. Il est sans usages.

Cérium. — Le cérium est solide, très-cassant, lamelleux, blanc-grisâtre. Sa pesanteur spécifique est inconnue; il est presque infusible; cependant on parvient à en sublimer de petites portions. Lorsqu'on le chauffe jusqu'au rouge, à l'air libre, il s'oxyde et devient blanc; à une température élevée, il absorbe le gaz oxygène. Il n'a encore été trouvé qu'à l'état d'oxyde combiné avec la silice et l'oxyde de fer; avec la chaux et l'alumine, et avec l'acide fluorique d'une part, et avec l'acide fluorique et l'yttria de l'autre. Ce métal est sans usages.

Cobalt. — Le cobalt est solide, dur et cassant; son grain est fin et serré; sa couleur est un peu moins blanche que celle de l'étain. Sa densité est de 8,5384. On ne l'a point encore obtenu cristallisé. Il fond à peu près au même degré de feu que le fer, à environ 130 degrés du pyromètre de Wedgwood; il n'est point volatil; il n'a d'action à la température ordinaire, ni sur le gaz oxygène, ni sur l'air sec; son action sur ces gaz humides est indéterminée. A une température élevée, il se combine avec le gaz oxygène, en donnant lieu à la formation d'un oxyde noir et à un dégagement de calorique; à cette dernière température, il agit sur l'air de la même manière que le gaz oxygène. Il se trouve sous trois états dans la nature : à l'état d'oxyde, à l'état de sulfate et d'arséniate. Le cobalt est sans usages; mais plusieurs des composés dont il fait partie en ont d'importants : tels sont surtout l'oxyde et l'arséniate de cobalt, dont on se

sert pour colorer en bleu les porcelaines, faire le bleu d'azur et le bleu de cobalt proprement dit.

Titane. — Le titane n'a pu être obtenu encore que sous la forme de pellicules friables, d'un rouge plus foncé que le cuivre; ces pellicules sont brillantes et paraissent être le titane à l'état métallique. On peut donc dire qu'il est solide, brun-rouge et cassant; il est infusible, ou plutôt il résiste au feu de nos meilleures forges. A la température ordinaire, il n'a aucune action ni sur le gaz oxygène, ni sur l'air secs; on ne sait pas s'il en a sur ces gaz humides. Mis en contact avec l'air au degré de la chaleur rouge, il s'oxyde et devient bleu; il suit de là qu'il peut absorber le gaz oxygène à une température élevée. Le titane n'a encore été trouvé qu'à l'état d'oxyde; cet oxyde est rarement pur; il est presque toujours combiné soit avec l'oxyde de fer, soit avec la silice et la chaux. On trouve des mines de titane en un assez grand nombre de lieux, mais jamais en grande quantité. Ce métal est sans usages.

Bismuth. — Le bismuth est solide, blanc-jaunâtre, très-cassant, facile à réduire en poudre; sa structure est lamelleuse; il cristallise très-facilement et très-régulièrement; ses cristaux sont des cubes qui se disposent ordinairement, les uns par rapport aux autres, de manière à former une pyramide quadrangulaire renversée, dont chaque face présente une sorte d'escalier. Sa pesanteur spécifique est de 9,822. Le bismuth est un des métaux qui entrent le plus facilement en fusion; il fond à environ 256 degrés. A la température ordinaire, il n'a point d'action sur le gaz oxygène et sur l'air sec, mais il en a une légère sur ces gaz humides, et il se ternit, comme l'antimoine, par leur contact. A une température élevée, il absorbe le gaz oxygène; il en résulte un oxyde très-jaunâtre, très-fusible, un dégagement de calorique, et de plus un dégagement de lumière, si la température est voisine du rouge brun. Le bismuth se trouve sous trois états : à l'état natif, à l'état d'oxyde, et combiné tout à la fois avec le soufre et l'arsenic. Il est plus souvent sous ce dernier état que sous celui des deux autres. Les usages du bismuth sont très-bornés; on ne s'en sert guère que pour faire le blanc de fard ou le sous-nitrate de bismuth.

Cuivre. — Le cuivre est solide, rouge-jaunâtre, très-brillant. A peine est-il en contact avec la flamme, qu'il la colore en vert; il acquiert de l'odeur par le frottement. C'est le plus beau, le plus sonore des métaux; c'est aussi l'un des plus ductiles; on en fait des feuilles très-minces et des fils d'un très-petit diamètre. Sa ténacité est inférieure à celle du fer, mais plus grande que celle du platine, de l'argent, de l'or. Sa pesanteur spécifique est de 8,895. Le cuivre est fusible à 27 degrés environ du pyromètre de Wedgwood. Son action sur le gaz oxygène et sur l'air secs est nulle à la température ordinaire; il en a une faible sur les gaz humides, et s'oxyde alors avec l'un et l'autre; sa surface se recouvre d'une légère couche d'oxyde dans son contact avec le premier, et d'une légère couche de carbonate dans son contact avec le second : les statues d'airain en sont une preuve sans réplique. Ce métal est capable de former des alliages avec la plupart des métaux. Parmi les corps combustibles non métalliques, il n'y a que le

phosphore, le soufre, le sélénium, le chlore, l'iode, avec lesquels il ait pu être uni jusqu'à présent.

Le cuivre existe sous quatre états : 1° à l'état natif; 2° à l'état d'oxyde; 3° à l'état combiné avec les corps combustibles; 4° à l'état de sel (sulfate, carbonate, arséniate). Le cuivre natif est tantôt cristallisé, tantôt en masses, tantôt en lames, tantôt en grains.

Tellure. — Le tellure est solide, brillant, très-cassant, facile à réduire en poudre; sa couleur tient le milieu entre celle de l'étain et de l'antimoine; sa structure est lamelleuse; sa pesanteur spécifique est de 6,115. Le tellure est un peu moins fusible que le plomb, et se recouvre de petites aiguilles en passant de l'état liquide à l'état solide. Lorsqu'on le soumet à une chaleur plus grande que celle qui est nécessaire pour le fondre, il bout, se volatilise et se condense en gouttelettes. Le tellure ne doit avoir aucune action à froid sur le gaz oxygène et sur l'air secs. Il est probable que, mis en contact avec ces gaz humides, à cette même température, il perdrait une partie de son brillant, deviendrait terne, et que sa surface s'oxyderait légèrement dans l'espace d'un certain nombre de jours.

Le tellure n'a encore été trouvé que combiné ou mêlé avec différents métaux : 1° avec le fer et l'or : cette mine est composée de 925,50 de tellure, 72 de fer et 2,50 d'or; 2° avec l'or et l'argent: cette mine est composée de tellure 0,60, d'or 0,30, d'argent 0,10; 3° avec le plomb, l'or, l'argent et le soufre : cette mine est d'une couleur blanche tirant sur celle du laiton, et composée de tellure 44,75, de plomb 19,50, d'or 26,75, d'argent 8,50, de soufre 0,50; 4° avec le plomb, l'or, le soufre, le cuivre: cette mine est feuilletée, d'un gris de plomb foncé et composée de tellure 32,20, de plomb 54, d'or 9, d'argent 0,50, de cuivre 1,30, de soufre 3.

Nickel. — Le nickel est solide, un peu moins blanc que l'argent; il est très-ductile; on peut le réduire en lames et en fils; sa pesanteur spécifique est de 8,666 lorsqu'il a été forgé, et de 8,279 lorsqu'il n'a été que fondu. Il possède la vertu magnétique à un grand degré; on ne l'a point encore obtenu cristallisé. Le nickel est aussi difficile à fondre que le manganèse; lorsqu'on le réduit, il s'en volatilise une quantité très-sensible. A la température ordinaire, son action sur le gaz oxygène et sur l'air secs est nulle; à une température rouge, le nickel absorbe avec rapidité le gaz oxygène : il en résulte un oxyde vert et un dégagement de calorique. Les combinaisons du nickel avec le phosphore, le soufre, le chlore s'opèrent facilement. Il s'unit aussi à l'iode et à la plupart des métaux. Le nickel se trouve à l'état d'oxyde, à l'état d'arséniate et à l'état de combinaison avec l'arsenic, le fer, le cobalt, le soufre et quelques autres métaux.

Plomb. — Le plomb est solide, blanc-bleuâtre, brillant; frotté entre les mains, il leur communique une odeur sensible. C'est l'un des métaux les plus mous; il est sans sonorité; il est rayé par presque tous les autres corps; il est très-malléable et s'étend facilement en lames; sa densité est de 11°,352. Après le mercure, le potassium, le sodium, l'étain et le bismuth, c'est le métal le plus fusible; sa fusion a lieu vers le 260e degré de chaleur; il n'est pas sensiblement volatil; à la température ordinaire, son action

est nulle sur le gaz oxygène et sur l'air secs. Il s'unit facilement au phosphore, au soufre, au chlore, à l'iode et à la plupart des métaux. Il se trouve sous trois états : 1° à l'état d'oxyde; 2° à l'état de combinaison avec les corps combustibles et particulièrement avec le soufre; 3° à l'état de sel, de sulfate, de phosphate, de carbonate, de chromate, de molybdate et d'arséniate. En raison de sa grande abondance dans la nature, et de la facilité avec laquelle il se prête aux différentes formes qu'on veut lui donner, c'est un des métaux les plus employés.

MÉTAUX DE LA 5e SECTION.

Les métaux de la cinquième section sont ceux qui ne décomposent l'eau ni à froid ni à chaud, qui absorbent le gaz oxygène à une certaine température, et dont les oxydes sont réductibles par la chaleur seule; ces métaux ne sont qu'au nombre de deux : le mercure et l'osmium.

Mercure. — Le mercure est liquide, très-brillant, d'un blanc bleuâtre; sa densité est de 13,568 et sa dilatation de $\frac{100}{5550}$ de son volume à o degré entre les termes de la glace fondante et de l'eau bouillante. Il entre en ébullition à 350 degrés; c'est sur cette propriété qu'est fondé l'art de le purifier. Soumis à un froid de 40 degrés, le mercure se solidifie et cristallise en octaèdres. A la température ordinaire, il n'a aucune action sur le gaz oxygène et sur l'air, secs ou humides; ce n'est qu'à un degré voisin de celui auquel il entre en ébullition, qu'il agit sur eux; il passe alors à l'état de deutoxyde ou d'oxyde rouge. Le mercure se trouve à l'état natif, à l'état de combinaison avec le soufre, uni à l'argent, et enfin à l'état de chlorure. De ces mines, la plus commune est le sulfure. Les usages du mercure sont très-nombreux; tout le monde sait que c'est avec le mercure qu'on construit les thermomètres et les baromètres.

Osmium. — L'osmium est solide, noir ou bleuâtre; comme on n'est point encore parvenu à le fondre, on ne sait pas s'il est ductile ou cassant, quelle est sa pesanteur spécifique, s'il est brillant, dur, etc. Chauffé avec le contact de l'air, il s'oxyde et se volatilise sous forme de fumée blanchâtre et très-piquante. Il n'a été uni avec aucun corps combustible non métallique, et l'on n'a examiné que quelques alliages dont il fait partie. L'osmium n'a été trouvé que dans le platine brut, combiné avec l'iridium, sous forme de petits grains très-durs, brillants, cassants et dont la pesanteur spécifique est de 19,5.

MÉTAUX DE LA 6e SECTION.

Les métaux de la sixième section sont ceux qui ne peuvent décomposer l'eau ni à chaud ni à froid, qui n'absorbent le gaz oxygène à aucune température, et dont les oxydes sont facilement réductibles par la chaleur seule. Ces métaux sont au nombre de six : l'argent, le palladium, le rhodium, le platine, l'or et l'iridium.

Argent. — L'argent est solide, blanc, très-brillant, très-malléable, très-ductile. On en fait des fils très-déliés et des feuilles si minces, que le moindre souffle les enlève. Il n'a pas beaucoup de dureté;

il ne répand pas d'odeur par le frottement; sa ténacité est très-grande; sa pesanteur spécifique est de 10,4743. Il entre en fusion un peu au-dessus de la chaleur rouge-cerise : d'où il suit qu'on le fond facilement dans un petit fourneau à réverbère. Il est sans action sur le gaz oxygène et sur l'air, secs ou humides, à la température ordinaire. Il forme des alliages avec la plupart des métaux. L'argent existe à l'état natif, à l'état de combinaison soit avec le soufre, soit avec le chlore, soit avec l'antimoine, soit avec l'arsenic, soit avec le mercure, et enfin à l'état d'oxyde d'argent et d'antimoine sulfuré. Nous ne parlerons pas des usages de l'argent, qui sont connus de tout le monde.

Palladium. — Le palladium est solide, blanc, dur, très-malléable; sa cassure est fibreuse; sa pesanteur spécifique est de 11,3. Il ne peut être fondu qu'au chalumeau d'oxygène comme le platine. Quelque temps après qu'il est en fusion, il bout et brûle avec des aigrettes éclatantes. Il ne s'oxyde point à la température d'un feu de forge ou au-dessous, et son oxyde se réduit promptement quand on le chauffe. Il se combine avec le soufre, le sélénium et plusieurs autres métaux. On ne le trouve que dans la mine de platine et en très-petite quantité.

Rhodium. — Le rhodium est solide, blanc-gris, cassant; sa pesanteur est de 11,00; il est infusible. Il n'a d'action ni sur le gaz oxygène, ni sur l'air, soit à froid, soit à chaud. Ce métal ne se trouve, comme le palladium, que dans la mine de platine; il n'y entre que pour une très-petite quantité.

Platine. — Le platine est solide, presque aussi blanc que l'argent, très-brillant, très-ductile et très-malléable. Il se coupe avec des ciseaux; mais la présence d'un peu de métal étranger, surtout d'iridium, d'osmium, le rend tout de suite très-dur. Sa ténacité est grande, et sa pesanteur spécifique est de 20,98, quand il n'a point été forgé. Ce métal résiste à l'action de nos plus violents feux de forge; on ne parvient à le fondre qu'au moyen d'un feu alimenté par le gaz oxygène. Il n'a d'action sur le gaz oxygène ni sur l'air à aucune température; il ne s'oxyde dans l'air que par une forte décharge électrique. Il forme des alliages avec un grand nombre de métaux. Le platine n'existe que combiné avec le fer, le rhodium, le palladium, le plomb, le cuivre, le soufre et presque toujours en petits grains aplatis. Ce métal est employé pour faire des creusets, des capsules, des cornues, des tubes pour les opérations de chimie; on s'en sert aussi pour faire la lumière des canons de fusil et revêtir le fond des bassinets; et l'on en fait aussi des chaudières pour les besoins des arts.

Or. — L'or est solide, jaune, très-brillant, inodore, insipide. C'est le plus ductile et le plus malléable de tous les corps: on en fait des fils très-fins, et on le réduit par le battage en feuilles de 0,00009 d'épaisseur. Sa ténacité est très-grande. Il a peu de dureté. Sa pesanteur spécifique est de 19,257. L'or est moins fusible que l'argent; il ne fond qu'au-dessus de la chaleur rouge, à environ 32 degrés du pyromètre de Wedgwood. Cependant on peut en opérer la fusion dans un fourneau à réverbère. Il n'est pas volatil à un feu de forge et n'a aucune action, soit à froid, soit à chaud, sur le gaz oxygène et sur l'air; il s'unit à presque tous les métaux, mais il ne s'unit pas à l'hy-

drogène, ni au bore, ni au carbone, ni à l'azote. L'or n'existe qu'à l'état natif ou combiné avec un peu d'argent, de cuivre, de fer. L'or est employé, comme l'argent, pour faire des vases, des ornements, des ustensiles, de la monnaie, etc.

Iridium. — L'iridium est solide, presque aussi blanc que le platine, sans odeur, sans saveur. On ne connaît pas sa pesanteur spécifique. Il résiste à l'action de nos plus violents feux de forge. Il n'est altéré à aucune température, ni par le gaz oxygène, ni par l'air. Parmi les corps combustibles simples, il n'a été uni jusqu'à présent qu'avec le soufre et quelques métaux, le plomb, le cuivre, l'étain, l'argent. Ce métal ne se trouve naturellement que combiné avec l'osmium, et mêlé dans cet état avec la mine de platine sous forme de petits grains qui ressemblent beaucoup à cette mine. Il est très-rare et sans usages.

DES ALLIAGES.

Nous avons vu que les métaux pouvaient se combiner les uns avec les autres; les composés qui en résultent portent le nom d'*alliages;* quand le mercure entre en combinaison avec un métal, on lui donne le nom d'*amalgame*. Les alliages offrent la plupart des propriétés communes aux métaux; tous sont solides, à l'exception du potassium allié au sodium, et des amalgames avec excès de mercure; ils sont brillants, à moins qu'ils ne soient en poussière trop fine; ils ont une couleur qui leur est propre; ils sont opaques, et possèdent une densité qui participe de celle des métaux constituant l'alliage; tous cristallisent plus ou moins bien; quelques-uns ont une odeur particulière; d'autres sont très-sonores et très-élastiques. Comme les métaux, ils conduisent très-bien le calorique et le fluide électrique.

Une propriété remarquable des alliages, c'est d'être plus durs, plus cassants, plus aigres et moins ductiles que ne le sont les métaux qui les composent. On peut dire, en général, que les alliages formés par des métaux cassants, le sont aussi sans exception; que ceux qui sont formés par un métal ductile et un métal cassant, sont cassants quand les deux métaux sont en proportions égales, et qu'ils ne participent, au contraire, des propriétés d'un métal ductile que quand celui-ci est très-prédominant. Les métaux ductiles donnent eux-mêmes, en se combinant, lieu à des alliages cassants, à moins que l'un des deux métaux ne soit très-prédominant. Il paraît que les métaux en s'unissant diminuent ou augmentent de volume, en sorte que leur densité est très-variable.

Soumis à l'action du feu, les alliages s'échauffent rapidement, se dilatent et entrent en fusion; l'alliage est toujours plus fusible que le métal le moins fusible qui le compose. Les alliages qui contiennent des métaux volatils se décomposent toujours en tout ou en partie, quand on les soumet à l'action d'une température élevée. Ainsi les amalgames perdent leur mercure totalement, pendant que les alliages d'arsenic, de potassium, de tellure, de cadmium, de zinc ne se décomposent qu'en partie.

L'oxygène et l'air agissent sur les alliages comme sur leurs métaux séparés, seulement l'action est moins vive. Si l'un des deux métaux est

très-oxydable, et que l'autre ne le soit pas, on peut très-facilement les séparer en oxydant le premier, ce qui a lieu pour le plomb et l'argent.

Plusieurs alliages se trouvent naturellement formés. On les prépare en fondant les métaux dans un creuset, et agitant le mélange après sa fusion. On coule ensuite l'alliage dans des moules. Beaucoup d'alliages sont usités dans les arts; nous détaillerons leurs usages en parlant des plus employés.

Amalgame d'étain. — Il est liquide, un peu moins coulant que le mercure; la chaleur le décompose; il n'absorbe que difficilement l'oxygène, et s'obtient en chauffant 1 partie d'étain et 1 partie de mercure. 1 partie d'étain et 3 de mercure donnent un amalgame mou, facilement cristallisable. Parties égales donnent un amalgame solide. On se sert de cet amalgame pour faire les glaces et les miroirs. L'amalgame en se formant adhère fortement aux parois de la glace, et lui donne la propriété de réfléchir les objets.

Amalgame de bismuth. — Il est en partie liquide et en partie cristallisé; il fond facilement, il s'attache aux corps qu'il touche, se décompose par la chaleur, et s'obtient comme le précédent. On s'en sert à étamer les globes de verre.

Bronze. — Le bronze est un alliage formé de 11 parties d'étain et de 100 de cuivre; il est solide, jaunâtre, plus dense que la moyenne des deux métaux; plus tenace, plus dur et plus fusible que le cuivre, sans action sur l'oxygène à la température ordinaire, mais se recouvrant à l'air humide d'une couche de carbonate basique, comme on le voit sur les statues de bronze. On l'emploie pour faire les canons et les statues.

Métal de cloche. — Ce métal est solide, à grains fins et serrés, d'un blanc gris, cassant, très-sonore, se comportant avec l'oxygène comme le précédent; il s'obtient en fondant ensemble 22 parties d'étain et 78 parties de cuivre, puis coulant l'alliage liquide pour lui donner la forme convenable.

Tam-tam ou gong. — Plus sonore que le précédent, ce métal s'emploie à faire les cymbales, les timbres d'horloge, les miroirs métalliques, et enfin l'instrument dont il tire son nom. On l'obtient en alliant 20 parties d'étain et 80 parties de cuivre. Cet alliage devient malléable par la trempe.

Cuivre étamé. — Ce métal n'est autre que du cuivre sur lequel on a appliqué une couche très-mince d'étain. Pour y parvenir, on chauffe la pièce à étamer, et on la frotte avec une étoupe après l'avoir saupoudrée de sel ammoniac qui la décape; alors on chauffe de nouveau le cuivre, et l'on étend dessus une couche d'étain fondu, qu'on peut recouvrir de résine afin que l'étain ne s'oxyde pas; on doit continuer de frotter jusqu'à ce que l'étain soit bien étendu. Dans cet étamage, l'étain ne s'allie point au cuivre; il n'est tout simplement que superposé : de là vient qu'il ne dure pas très-longtemps.

Fer-blanc. — Ce n'est autre chose que du fer réduit en feuilles, dont les deux surfaces sont recouvertes d'une couche d'étain.

Fer galvanisé. — Ce produit, nouvellement introduit dans l'industrie, s'obtient en plongeant le fer bien décapé dans du zinc fondu;

l'alliage qui se forme à la surface préserve le fer de l'oxydation : de nouvelles recherches faites sur le fer zingué ont fait reconnaître qu'il possède comme l'acier, par rapport au magnétisme, des propriétés coercitives.

Soudure des plombiers. — Cet alliage est solide, blanc-gris, malléable, plus fusible que l'étain, brûle facilement dans l'air à la chaleur rouge, et se convertit en *stannate de plomb*. On l'obtient en fondant ensemble 1 partie d'étain et 2 de plomb ; on l'emploie pour souder les tuyaux de plomb. Selon Vauquelin, l'alliage qui ne contient que 0,71 de plomb n'est attaqué ni par le vin, ni par le vinaigre, et peut servir à faire des ustensiles ; mais il se ternit promptement.

Alliage d'antimoine et de plomb. — Solide, malléable, beaucoup plus dur que le plomb, fusible au-dessous du rouge-cerise, absorbe l'oxygène à une température élevée, en formant un *antimonite de plomb*. On l'obtient en fondant 20 parties d'antimoine et 80 de plomb ; quelquefois on y ajoute quelques centièmes de cuivre. On s'en sert pour faire les caractères d'imprimerie.

Cuivre jaune. — Cet alliage est jaune, très-malléable et très-ductile à froid, fragile au-dessous du rouge obscur, plus fusible que le cuivre. Exposé à un violent feu de forge, il perd presque tout le zinc qu'il contient, il s'oxyde à une température élevée. On le prépare en alliant 2 parties de cuivre avec 1 partie de zinc. Dans une autre espèce de laiton, on fait entrer 2 à 3 centièmes de plomb, ce qui le rend plus convenable pour les ouvrages faits au tour.

Le laiton de Jemmapes est formé de 0,641 de cuivre, de 0,336 de zinc, de 0,020 de plomb et de 0,03 d'étain. Le chrysocale est un laiton formé de 0,81 de cuivre, 0,08 de zinc et de 0,005 d'étain. Le laiton est employé pour faire la plupart des instruments de physique, différents vases de chimie, etc.

Alliage d'argent et de cuivre. — Les différents alliages de cuivre et d'argent employés sont blancs, moins ductiles et plus fusibles que l'argent, n'absorbant l'oxygène qu'à une température élevée, et alors le cuivre s'oxyde tandis que l'argent reste pur. Pour l'obtenir, on fond dans un creuset 9 parties d'argent et 1 de cuivre. C'est avec cet alliage qu'on fait en France toute la monnaie d'argent. Si, au lieu des proportions précédentes, on emploie 4 parties de cuivre sur 1 d'argent, on obtient l'argent ou la monnaie de billon. Celui qu'on emploie pour les ouvrages d'orfévrerie est formé de $9\frac{1}{2}$ parties d'argent et de $\frac{1}{2}$ partie de cuivre ; quand on doit en faire des couverts et de la vaisselle, il est formé de 8 parties d'argent et de 2 de cuivre.

Les différentes quantités d'argent qui composent l'alliage constituent son *titre*, qui est d'autant plus élevé que l'alliage est plus riche en argent. Ainsi on dit de l'argent de monnaie qu'il est au titre de $\frac{900}{1000}$; celui du billon au titre de $\frac{200}{1000}$; et celui qu'emploient les orfévres, tantôt au titre de $\frac{950}{1000}$, tantôt à celui de $\frac{800}{1000}$.

Alliage d'or et de cuivre. — D'un beau jaune d'or, moins ductile, plus dur et plus fusible que l'or, n'absorbe l'oxygène qu'à une haute

chaleur ; alors le cuivre s'oxyde et l'or s'épure. On l'obtient en fondant ensemble neuf parties d'or et une de cuivre. C'est le seul titre qui soit employé à la fabrication de la monnaie d'or. Quant aux vases et ornements d'or, les titres varient : ainsi les uns sont à celui de $\frac{920}{1000}$, les autres de $\frac{840}{1000}$, enfin d'autres à celui de $\frac{750}{1000}$; d'où trois titres pour les ouvrages d'or, pendant que ceux d'argent n'en ont que deux.

Vermeil. — On donne le nom de *vermeil* à de l'argent que l'on a doré avec un amalgame d'or. On fait avec lui une foule de vases, de couverts, etc.

Alliage fusible dans l'eau bouillante. — Cet alliage est d'un gris de plomb, fusible à 90 degrés, par conséquent dans l'eau bouillante ou la vapeur. Pour l'obtenir, il suffit d'unir par la fusion 3 parties d'étain, 8 de bismuth et 5 de plomb. On s'en sert pour clicher les médailles. En y ajoutant un peu de mercure, il devient beaucoup plus fusible et peut servir à faire des injections anatomiques.

Procédé galvanoplastique pour dorer, argenter, platiner, etc., les métaux. — C'est l'art d'appliquer à volonté les métaux les plus inaltérables ou les plus beaux, en couches aussi minces qu'on le veut, sur des objets façonnés avec des métaux moins chers et plus tenaces que ceux-ci. Par exemple, le fer, l'acier, le cuivre, peuvent par ce procédé être recouverts d'or, d'argent ou de platine, etc., et devenir de cette manière moins oxydables ou d'un emploi plus salubre.

M. de la Rive avait déjà donné un procédé pour dorer l'argent et le laiton ; mais les procédés pour dorer en grand sont dus à MM. Ruolz et Elkington.

M. Ruolz emploie une pile de quarante couples de 16 centimètres de large sur 8 de hauteur. Le pôle positif est terminé par un fil de platine, et le pôle négatif par un fil de cuivre ; tous les deux se rendent dans une auge où se trouve un bain d'or ou autre. On place les objets à dorer ou à argenter sur le fil de cuivre, tandis que le fil de platine les longe sans les toucher. Le cyanure d'or dissous dans du cyanure simple de potassium, dans le cyanoferrure jaune ou dans le cyanoferrure rouge ; le chlorure d'or dissous dans les mêmes cyanures, etc., sont les dissolutions dont M. Ruolz se sert comme bains. Mais de toutes ces dissolutions, celle qui paraît le mieux réussir est le sulfure d'or dissous dans du sulfure neutre de potassium. La dorure est plus belle et plus dure de ton.

M. Elkington prend 31 grammes 25 centigrammes d'or converti en oxyde, 5 hectogrammes de cyanure de potassium et 4 litres d'eau. Après une ébullition d'une demi-heure, le liquide peut servir : bouillant, il dore beaucoup plus vite que lorsqu'il est froid. Pour cela il ne faut plus qu'y faire plonger les deux pôles d'une pile à courant constant, l'objet à dorer étant suspendu au pôle négatif, où le métal de la dissolution vient se rendre.

M. Ruolz est parvenu par ses procédés à cuivrer, zinguer, plomber, etc., divers métaux usuels. Une condition indispensable de succès, c'est que les surfaces des métaux précipitants soient bien nettes.

DES OXYDES MÉTALLIQUES.

Les oxydes métalliques sont des combinaisons binaires qui résultent de la combinaison de l'oxygène avec les métaux; ils sont généralement divisés en six sections comme les métaux qu'ils ont pour radical : cependant, on peut les classer en quatre classes bien distinctes, d'après les propriétés qu'ils possèdent :

1°. Les oxydes qui jouissent des propriétés acides bien marquées et se combinent très-bien avec les bases; on leur a donné le nom d'*acides métalliques :* tels sont les acides arsénieux, chromatique, antimonique, antimonieux, tungstique, etc.;

2°. Les oxydes qui jouissent des propriétés basiques, et qui sont les oxydes proprement dits : ils se combinent très-bien aux acides;

3°. Les oxydes qui ne se combinent ni aux bases ni aux acides : ils sont *neutres* ou *indifférents ;*

4°. Enfin, les oxydes qui ne se combinent aux acides qu'après avoir perdu une certaine quantité d'oxygène; on leur a donné le nom d'*oxydes singuliers :* tels sont les bioxydes de manganèse, de barium, le peroxyde de potassium, de sodium, etc.

Les oxydes sont solides, cassants, ternes, de couleur qui varie beaucoup; ils sont inodores et insipides, excepté ceux de la première section ou ceux qui sont solubles; plus pesants que l'eau et moins que le métal qui les forme, à moins que ce ne soit le potassium ou le sodium. Aucun n'a d'action sur la teinture du tournesol; quelques-uns la ramènent au bleu, si elle a été rougie par un acide; les oxydes de la première section et celui de magnésie verdissent le sirop de violette et rougissent la couleur jaune du curcuma.

La chaleur réduit les oxydes des deux dernières sections; elle n'altère pas ceux de la deuxième; parmi les oxydes de la première, troisième et quatrième sections, aucun ne peut être entièrement réduit par la chaleur; quelques-uns perdent une portion d'oxygène et passent à un degré inférieur d'oxydation : tels sont les bioxydes de calcium, strontium, manganèse, plomb, sesquioxyde de sodium, urane, cobalt, etc. Aucun oxyde n'est volatil, si ce n'est quelques oxydes qui jouent le rôle d'acides, tels que le peroxyde d'osmium et l'acide arsénieux : cependant le protoxyde d'antimoine est volatil.

Tous les oxydes peuvent être décomposés par une pile de 100 paires : dans ce cas, l'oxygène se dégage au pôle positif et le métal réduit se rend au pôle négatif.

Parmi les oxydes, il n'y a que le protoxyde de fer, et l'oxyde de fer composé (FO, F^2O^3) qui soient sensibles à l'action de l'aiguille aimantée.

L'hydrogène ne réduit les oxydes qu'à une haute température, encore n'a-t-il pas d'action sur les oxydes terreux et sur les protoxydes alcalins. Dans tous les cas, il se forme de l'eau, et le métal est mis à nu.

Le carbone, à une température élevée, décompose tous les oxydes métalliques, excepté ceux de la deuxième section, et les protoxydes de barium, de strontium, de calcium et de lithium. Le carbone, en s'unissant à l'oxygène, forme ou de l'oxyde de carbone ou de l'acide

carbonique, et toujours le métal est réduit. C'est à l'aide de ce métalloïde et du précédent qu'on réduit dans les arts une bonne partie des métaux usités.

Le phosphore et le sonfre ont deux manières d'agir selon qu'on opère par la voie sèche ou la voie humide. Par la voie sèche, le métalloïde réduit une portion de l'oxyde, s'empare de son oxygène pour former l'acide le plus oxygéné qui se combine avec l'oxyde non décomposé, à moins que celui-ci ne soit décomposable à la température à laquelle on opère, pendant que le métal, réduit avec une portion de métalloïde, forme, par cette union, un phosphure ou un sulfure. Si l'on opère au contact de l'eau, la même décomposition se fait; mais au lieu des oxydes les plus oxygénés, il ne se fait avec le phosphore que peu d'acide phosphorique, et un hypophosphite; dans ce cas, l'eau est en même temps décomposée, de là un dégagement de sesquiphosphure d'hydrogène. Si l'on a employé le soufre, on obtient un hyposulfite et un sulfure sulfuré ou polysulfure.

L'iode décompose à sec et à une température élevée les oxydes de potassium, de sodium, de bismuth et de plomb; l'oxygène se dégage et l'iode s'unit au métal; les protoxydes d'étain et de cuivre passent à l'état de peroxyde, tandis qu'une portion de métal se combine à l'iode. Il paraît s'unir aussi à la baryte, à la strontiane et à la chaux, et être sans action sur les autres oxydes.

Le chlore a sur les oxydes une action qui mérite quelque attention. Si l'on fait passer un courant de chlore sur un oxyde métallique, exposé dans un tube horizontal et porté au rouge, on remarque que l'oxygène est dégagé et que le chlore se substitue à sa place. Il ne paraît y avoir que les oxydes de la deuxième section qui soient exceptés de cette règle. Si l'on fait passer un courant de chlore dans une eau tenant en dissolution ou en suspension un oxyde, celui-ci sera en partie décomposé; son métal mis à nu formera un chlorure avec une portion de chlore, et son oxygène, s'unissant à une partie du chlore, formera de l'acide hypochloreux qui s'unira à l'oxyde non décomposé. Si la dissolution est concentrée, ou si la chaleur s'élève pendant la réaction, alors une portion d'oxygène, au lieu de se combiner avec une nouvelle proportion de chlore pour former un hypochloryte, s'unira à l'acide hypochloreux déjà formé pour le faire passer à l'état d'acide chlorique; de là la présence des chlorates dans les produits de ces sortes de réactions.

L'action des métaux sur les oxydes métalliques dépend de leur affinité réciproque pour l'oxygène. Si donc le métal appartient aux premières sections, et l'oxyde, au contraire, aux dernières, le métal pourra décomposer l'oxyde, s'emparer de son oxygène et réduire l'autre métal; celui-ci rendu libre pourra, dans beaucoup de circonstances, se combiner au métal décomposant, si ce dernier s'y trouve en excès; il résulte de cela que le potassium, le sodium et les autres de la première section pourront décomposer tous les oxydes, à l'exception de ceux de la deuxième section; quelquefois ces décompositions ne sont que partielles : c'est quand le métal décomposant ayant pour l'oxygène une affinité à peu près égale à celle du métal de l'oxyde, cet oxyde se trouve porté au *summum* d'oxydation;

alors l'autre métal s'empare de l'excès d'oxygène. Cette décomposition partielle peut encore être sollicitée par une foule de causes que nous ne croyons pas devoir rapporter ici.

L'eau ne dissout que les oxydes métalliques de la première section; les protoxydes de fer, de manganèse et d'étain la décomposent en s'emparant de son oxygène. La plupart des oxydes peuvent contracter des combinaisons avec l'eau et former des *hydrates*, sortes de sels dans lesquels l'eau joue le rôle d'acide et formés dans de telles proportions, que l'oxygène de l'eau est en quantité égale à celle de l'oxygène que contient l'oxyde. Ces combinaisons se font le plus souvent avec un dégagement de chaleur assez considérable; ainsi la chaux que l'on éteint développe en se combinant à l'eau une chaleur que l'on estime à plus de 300 degrés. L'eau en se combinant avec un oxyde lui donne quelquefois une couleur bien différente, comme on en a des exemples de l'hydrate de bioxyde de cuivre qui est bleu; dans celui de protoxyde de cobalt, qui est bleu-violet; celui de protoxyde de nickel, qui est vert-pré, etc.

On ne trouve dans la nature qu'un petit nombre d'oxydes à l'état libre; presque toujours on les trouve combinés à un acide ou à d'autres oxydes.

DES SELS.

On donne le nom de *sel* à la combinaison d'un métal quelconque avec les acides; cette combinaison ne peut se faire que lorsque le métal est à l'état d'oxyde: mais comme, outre les oxydes, l'ammoniaque, les alcalis végétaux, quinine, morphine, etc., peuvent aussi se combiner aux acides, on entend par sel *le composé qui résulte de la combinaison d'un acide avec une base salifiable.*

Berzelius distingue deux ordres de sels: 1° les *sels binaires*, qui en dissolution dans l'eau peuvent être considérés comme des sels ternaires; 2° les *sels ternaires*, donnant le nom de *corps halogènes* aux métalloïdes, qui, en se combinant immédiatement à un métal, donnent naissance à des composés binaires ayant les propriétés des sels: il désigne ceux-ci sous le nom de *sels haloïdes*.

Le chlore, par exemple, est un corps halogène qui, en se combinant au sodium, forme le sel marin, *sel haloïde,* qu'il serait difficile de ne pas considérer comme un sel. Il appelle *sels amphides* les sels qui résultent de la combinaison de deux corps binaires, comme un acide avec un oxyde, un sulfure basique avec un sulfure acide, un séléniure basique avec un séléniure acide, etc.

Les *sels haloïdes* se comportent comme les autres sels: en effet, si le chlorure de sodium est dissous dans l'eau ou seulement mis en contact avec une petite quantité d'eau et traité par l'acide sulfurique, il se fait un dégagement d'acide chlorhydrique, et il se forme du sulfate de soude. D'un autre côté, si l'on dissout du chlorure de magnésium, et si à cette dissolution on ajoute de la potasse ou de la soude, il se fait un précipité d'oxyde de magnésium: d'où il faut conclure que les chlorures offrent des réactions semblables au sel seulement quand ils sont en présence d'une petite quantité d'eau. Ces propriétés ont fait élever des discussions tendantes à prouver que ces sortes de sels

dissous devaient ou ne devaient pas être considérés comme des combinaisons d'oxydes et d'hydracides; sans entrer dans ces discussions, nous allons démontrer que, selon que l'on envisage l'une ou l'autre manière de voir, la théorie n'en reste pas moins claire et satisfaisante. En effet, soient les formules suivantes d'un sel haloïde en dissolution dans l'eau :

$$\begin{array}{r|l} \text{Chlorure de sodium} = \underline{Na} & \underline{Cl^2} \\ + \text{ 1 atome d'eau} = O & H^2 \end{array}.$$

On voit que, selon que l'on veut considérer l'eau comme décomposée ou non, on a un chlorhydrate ou un chlorure. En effet, si le trait est vertical, on a NaO = oxyde de sodium et Cl^2H^2 = acide chlorhydrique dans le premier cas; tandis que si le trait est horizontal, on a $NaCl^2$ = chlorure de sodium et OH^2 = eau pour le second cas. Cette dernière manière d'envisager la dissolution d'un sel haloïde est plus généralement admise.

Ce que nous venons de dire des chlorures peut aussi bien se dire des fluorures, iodures, bromures, cyanures, sulfures, solubles, etc.

Les sels sont *neutres*, *acides* ou *basiques*.

On a dit longtemps qu'un sel était neutre quand sa dissolution ne rougissait ni ne verdissait le sirop de violette, qu'un sel était acide lorsqu'il le rougissait, et qu'il était basique lorsqu'il le verdissait : mais cette manière de déterminer l'état de saturation d'un sel est rarement exacte; souvent on considère comme sel acide ou sel basique un sel véritablement neutre. En effet, la neutralité est une propriété relative qui dépend de l'affinité de l'acide pour l'oxyde, et l'on doit considérer comme neutre l'état de saturation dans lequel l'acide et l'oxyde perdent le plus leurs propriétés. Pour mieux déterminer la neutralité d'un sel, il vaut mieux recourir à leur composition qui est soumise à des lois remarquables, et l'on aura alors une manière sûre de trouver la neutralité d'un sel. En effet, supposons que nous ayons un acide énergique, l'acide sulfurique, et une base puissante, la potasse : en mêlant convenablement ces deux corps, il arrivera un point où le mélange n'aura aucune action sur le sirop de violette; alors la combinaison sera neutre, et le sel obtenu sera le sulfate neutre de potasse. Si l'on chauffe le sulfate au rouge obscur avec un excès d'acide sulfurique, on obtiendra un sel qui rougira le sirop de violette; ce sera le sulfate acide ou bisulfate de potasse. En analysant ces deux sels, on trouve que dans le sulfate neutre la quantité d'oxygène de la base est à la quantité d'oxygène de l'acide comme 1:3, et dans le sulfate acide comme 1:6. Or, si l'on considère comme neutre celui dans lequel les rapports sont comme 1:3, il est évident qu'il faudra appeler sulfates neutres, tous ceux qui offriront cette décomposition. On arrivera de la même manière à déterminer la neutralité de tous les genres de sels.

Classification des sels. — Les sels sont de la même *espèce* lorsqu'ils sont formés des mêmes bases et des mêmes acides dans les mêmes proportions; les variétés sont déterminées d'après les différences dans la forme cristalline; les *genres* sont formés de la réunion des espèces ayant pour principe commun l'acide ou le principe électro-négatif;

les *familles* peuvent être formées par la réunion de genres ayant entre eux beaucoup de rapports : ainsi les chlorures, les iodures, les bromures, les fluorures devront former une même famille; il en est de même des arséniates et des phosphates, des sulfates et des séléniates, etc.

Propriétés physiques. — Les sels sont solides, excepté le sous-fluoborate d'ammoniaque et l'acétate d'ammoniaque, qui sont liquides. Tous peuvent prendre des formes cristallines; leur pesanteur spécifique est plus grande que celle de l'eau, et dépend en général de la nature de l'oxyde; leur couleur est variable, ainsi que leur cohésion; leur saveur est déterminée par la nature de l'oxyde ou de la base : ainsi les sels de plomb sont sucrés, ceux de quinine sont amers, etc.; leur odeur est nulle; cependant quelques sels ammoniacaux avec excès de base ont une odeur ammoniacale.

Composition. — Tous les sels d'un même genre et au même état de saturation sont composés de telle manière, que la quantité d'oxygène de l'oxyde est proportionnelle à la quantité de l'acide : il existe même entre la quantité d'oxygène de l'acide et la quantité d'oxygène de la base un rapport simple tel, que l'oxygène de l'un est un multiple par un nombre entier de l'oxygène de l'autre.

Propriétés chimiques. — Soumis à l'action de la chaleur, certains sels se volatilisent sans décomposition; d'autres, au contraire, sont entièrement fixes : seulement ceux-ci fondent d'abord dans leur eau de cristallisation, quand ils en contiennent, se dessèchent, puis éprouvent une nouvelle fusion qu'on nomme *ignée*. Enfin d'autres se décomposent en perdant leur acide, et quelquefois les oxydes se suroxydent; d'autres fois ils se désoxydent, ce qui arrive aux sels des deux dernières sections. Quelquefois enfin l'eau qui contient un sel n'y est qu'à l'état d'interposition ; alors le feu, en vaporisant cette eau, fait briser les parties salines avec un bruit particulier qu'on nomme *décrépitation*.

Tous les sels, pourvu qu'ils soient humectés ou dissous, sont susceptibles de décomposition par un courant voltaïque ; alors le métal se rend au pôle négatif, et l'oxygène et l'acide se rendent au pôle positif.

L'eau dissout une grande quantité de sels; cette solubilité dépend de l'affinité du sel pour l'eau et de sa cohésion. En général, elle est en raison directe de la première cause et en raison inverse de la seconde. On remarque que l'ébullition de l'eau saturée d'un sel se fait à une température d'autant plus élevée que l'affinité du sel pour l'eau est plus grande. On peut donc mesurer cette affinité en plongeant un thermomètre dans la dissolution bouillante. Tous les sels dont la base est la soude, la potasse ou l'ammoniaque sont solubles, à moins qu'ils ne soient avec excès d'acide insoluble; de même tous les sels avec excès *d'acide soluble* sont eux-mêmes solubles. En général, ceux qui sont avec excès de base sont insolubles ou peu solubles, à moins que la base ne soit soluble.

Les sels sont généralement plus solubles à chaud qu'à froid; d'où il suit que par le refroidissement la dissolution doit abandonner une portion du sel ; mais comme cette séparation ne se fait que progres-

sivement, les particules du sel se réunissent par les faces qui se conviennent le mieux, d'où résulte un agrégat de particules salines affectant la forme d'un cristal. L'eau qui reste après que les cristaux se sont formés prend le nom *d'eau mère*.

Quand l'eau ne peut plus dissoudre un sel, on dit qu'elle est *saturée;* mais souvent elle peut dissoudre un autre sel, et quelquefois même l'autre sel lui donne la propriété de dissoudre le premier. La dissolution d'un sel dans l'eau se fait toujours avec absorption de calorique et d'autant plus que le sel est plus soluble.

La dissolution des sels dans l'eau est une véritable combinaison qui peut être représentée par une formule atomique.

L'eau joue tantôt le rôle de base, tantôt celui d'acide.

On a cependant observé que l'eau ne neutralise pas les sels qui ont une réaction alcaline ou acide, et que par conséquent les dissolutions salines ne sont pas des composés chimiques pouvant être comparés aux sels. Berthollet distingue deux espèces de saturations : la première est l'équilibre ou la neutralisation des propriétés antagonistes; la seconde est le terme de l'action chimique qu'un corps exerce sur un autre, sans que les propriétés caractéristiques des deux corps soient détruites. Les dissolutions salines appartiennent à cette seconde espèce de saturation.

Mélanges frigorifiques. — Voici les recettes les plus simples de mélanges frigorifiques : 5 parties de *chlorhydrate d'ammoniaque*, 5 de *nitre* et 16 d'*eau*, procurent un abaissement de température de 22 degrés. On peut employer ce mélange pour glacer les crèmes, rafraîchir le vin et l'eau.

Neige ou glace pilée 2 parties, *sel* 1 partie, on obtient ainsi un abaissement de température de 15 degrés. C'est le mélange frigorifique employé ordinairement dans les laboratoires et par les limonadiers pour fabriquer les glaces et les sorbets glacés. Cependant on réussit mieux encore en remplacant le sel par du chlorure de potassium.

Sulfate de soude cristallisé 4 parties, *acide sulfurique à* 41 *degrés* 3 parties; c'est le mélange le plus propre à obtenir de la glace au milieu de l'été d'une façon économique.

On appelle sels *déliquescents* ceux qui, exposés à l'action de l'air, attirent l'humidité que ce fluide contient et se résolvent en liqueur; on appelle sels *efflorescents* ceux qui, au contraire, perdent de leur eau et leur transparence, et tombent en poussière. Il est à remarquer cependant que dans un air saturé d'humidité tous les sels solubles sont déliquescents, et que les sels insolubles s'altèrent rarement.

Le potassium et le sodium, à une chaleur élevée et à sec, décomposent presque tous les sels; tantôt ils ne décomposent que l'acide du sel, d'autres fois ils décomposent l'acide et l'oxyde en réduisant le métal.

Si le sel est en dissolution, les métaux de la première section décomposent l'eau de préférence au sel, s'oxydent, et s'unissent à l'acide du sel en précipitant la base; quand le métal appartient à l'une des quatre dernières sections, alors il n'a plus d'action sur les sels des deux premières, mais ils peuvent agir sur une dissolution de sels des mêmes

sections que le métal, en se substituant à la place du métal qui contenait le sel, pourvu que le métal décomposant ait plus d'affinité pour l'oxygène et l'acide que celui de la dissolution. Ainsi le fer précipite le cuivre, le zinc précipite le plomb, etc.

Les oxydes de la première section, la magnésie et l'ammoniaque, décomposent tous les sels en s'emparant de leur acide, en tout ou partie. Dans le premier cas, l'oxyde se précipite; dans le second, il se forme un sel *double* qui se précipite ou reste en dissolution. Si la quantité d'oxyde ajouté n'est pas assez grande, il peut le plus souvent se former un précipité de sous-sel ou sel avec excès de base.

Les oxydes qui paraissent avoir le plus d'affinité pour les acides sont ceux de la première section, la magnésie et l'ammoniaque; mais leur affinité dépend en général de l'acide, comme l'affinité de l'acide pour les bases dépend de la nature de la base.

Parmi les acides, ceux qui sont les plus énergiques sont les acides sulfurique, phosphorique, azotique, chlorhydrique, chlorique, etc., et à une température élevée les acides borique, phosphorique, silicique, etc.

Lois de Berthollet. — De l'action qu'exercent les sels les uns sur les autres résultent des phénomènes que l'on peut énoncer en quatre lois principales :

1°. Quand on chauffe ensemble deux sels qui, par l'échange de leurs acides et de leurs bases, peuvent donner naissance à un sel volatil et à un sel fixe, la décomposition a constamment lieu.

2°. Si l'on mêle ensemble deux sels en dissolution, et que de leur réaction puissent se former un sel soluble et un sel insoluble, la décomposition se fera toujours, à moins que le sel insoluble et le sel soluble puissent, en se combinant, former un sel double, ce qui est très-rare. Cette sorte de réaction porte le nom de *double décomposition*.

3°. Si l'on met en contact un sel insoluble avec un sel soluble, et que ces sels contiennent les éléments capables de former deux sels insolubles, leur décomposition est forcée.

4°. Enfin, si l'on fait bouillir quelque temps un sel insoluble avec le carbonate de soude ou de potasse en dissolution, il y aura décomposition du sel insoluble, à moins que ce sel ne soit un silicate.

Quelques sels peuvent être mis en contact sans qu'il y ait apparition d'aucun phénomène; mais si l'on vient à évaporer la liqueur, on voit que, des quatre sels qui pourraient résulter de la combinaison des deux bases et des deux acides, celui qui est le moins soluble est celui qui se forme toujours.

Les sels peuvent encore se combiner les uns avec les autres et former des combinaisons plus complexes, que l'on nomme *sels doubles*.

Parmi les sels doubles employés, on peut citer l'alun, qui est un sulfate double d'alumine et de potasse ou d'ammoniaque; le sulfate de soude et de chaux, le sulfate de soude et de magnésie, le phosphate de soude et d'ammoniaque, etc.

Beaucoup de sels se trouvent dans la nature, mais la chimie en produit encore un plus grand nombre. Pour préparer les sels, on suit plusieurs procédés, dont les principaux peuvent être réduits à cinq :

1°. En combinant directement un acide avec un oxyde;

2°. En traitant les carbonates par les acides;

3°. En traitant, soit à froid, soit à chaud, un métal par un acide;

4°. En employant la voie des doubles décompositions;

5°. Enfin, pour obtenir des sels avec excès de base, en versant un peu de potasse, de soude ou d'ammoniaque dissous dans une dissolution saline en excès.

DES CARBONATES.

L'acide carbonique peut se combiner avec certaines bases en trois proportions et former des *carbonates neutres*, des *sesquicarbonates* et des *bicarbonates*.

Les carbonates de potasse, de soude, de baryte et de lithine sont les seuls qu'une chaleur élevée ne décompose pas; tous les autres perdent leur acide carbonique. Tous, à l'exception des carbonates de potasse, de soude et de lithine, sont insolubles; mais quelques-uns de ceux qui le sont se dissolvent dans un excès d'acide carbonique. Chauffés avec du bore, du phosphore ou du charbon, ils sont tous décomposés: de là résultent divers produits faciles à prévoir.

Tous les acides les décomposent en dégageant leur acide carbonique avec une sorte de boursouflement qu'on nomme *effervescence*. Quand le gaz qui se dégage est sans couleur, n'a qu'une odeur légèrement piquante, et ne répand point de vapeurs blanches dans l'air, le sel est un carbonate; les carbonates neutres sont formés de telle manière, que l'oxygène de la base est à l'oxygène de l'acide comme 1 : 2.

Carbonate de potasse. — Ce sel est blanc, âcre, caustique, verdissant le sirop de violette, très-soluble, déliquescent à l'air, cristallisant difficilement en lames rhomboïdales; fusible à la chaleur blanche et ne se décomposant que par un courant de vapeur d'eau; alors l'acide carbonique se dégage, et il se fait un *hydrate*. Il est formé de 1 atome d'acide et de 1 atome de base $= KO, C^2O^2$.

Potasse du commerce.— Ce produit, qui possède les mêmes propriétés que le sel précédent, est du carbonate de potasse contenant des quantités variables de sulfate de potasse, de chlorure de potassium, un peu d'alumine, de silice, de chaux, d'oxydes de fer et de manganèse. On se sert de cette potasse dans la fabrication du verre, de l'alun, du salpêtre, du savon mou, des lessives, etc.

Carbonate de soude. — Blanc, âcre, légèrement caustique, très-soluble dans l'eau, plus à chaud qu'à froid, et cristallisant par le refroidissement en prismes rhomboïdaux; il est efflorescent. Chauffé, il fond dans son eau de cristallisation, la perd, puis subit la fusion ignée; il ne se décompose que par un courant de vapeur. Il est formé de 2 atomes d'acide carbonique, 1 atome de base et 10 atomes d'eau $= (NaO, C^2O^2) + 10\, H^2O$.

On s'en sert dans les laboratoires comme réactif et quelquefois aussi dans les arts.

Soudes du commerce. — Elles sont formées de carbonate de soude en quantité variable, de sulfate de soude, de sulfate de sodium, de sel marin, de carbonate de chaux, d'alumine, de silice, d'oxyde de fer, de charbon, etc.

Carbonate de chaux. — Ce sel est blanc, sans saveur ni odeur, cristallisant sous plusieurs formes, pouvant être réduites en un rhomboïde; il est complétement insoluble dans l'eau, à moins qu'il ne contienne un excès d'acide carbonique; décomposable au feu en formant un résidu qui n'est que la chaux ordinaire. Il est formé de 1 atome d'acide carbonique et de 1 atome de chaux $= CaO\,C^2O^2$. On s'en sert pour faire la chaux pour bâtir. A l'état de marbre, on en fait des statues, des colonnes, etc.

Sesquicarbonate d'ammoniaque. — Blanc, caustique et piquant, d'une couleur d'ammoniaque très-prononcée, verdissant le sirop de violette, volatil même à l'air libre, soluble dans l'eau froide, mais pas dans l'eau bouillante, tant il est volatil. Il résulte de la combinaison de 1 volume d'acide carbonique et de 1 $\frac{1}{2}$ volume de gaz ammoniac $= 3AzH^3, 2C^2O^2$.

DES PHOSPHATES.

L'acide phosphorique trihydraté ($P^2O^5, 3H^2O$) peut se combiner avec les bases en trois portions et former des sels neutres $P^2O^5, 2RO, H^2O$; des sels acides P^2O^5, RO, H^4O, et des sels basiques $P^2O^5, 3RO$. En considérant l'eau comme jouant le rôle de base, tous ces sels sont dans un rapport tel, que la quantité d'oxygène de l'acide est à celui de l'oxyde comme 5 : 3, et dans ce cas l'acide lui-même, contenant 3 atomes d'eau, peut être considéré comme un véritable sel.

Exposés au feu, ces sels perdent l'eau qu'ils contiennent, et passent aux différentes modifications que nous avons fait connaître : ainsi le phosphate acide devient P^2O^5, RO, ce qui le constitue métaphosphate. Le phosphate neutre devient P^2O^5, 2RO ou pyrophosphate; enfin le phosphate basique, ne contenant pas d'eau, ne peut se transformer en l'un des deux autres acides, et reste, par conséquent, à l'état de phosphate. Ces acides étant fixes et les bases aussi, nulle autre décomposition ne peut avoir lieu; toutefois, ils se fondent et se vitrifient; mais si l'on y ajoute du charbon, divers phénomènes se présentent. Si le sel appartient à la première ou à la deuxième section, l'acide n'est qu'en partie décomposé; il se fait de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone qui se dégage, tandis que le sel devient avec excès de base. Avec les phosphates des quatre dernières sections, au contraire, tout l'acide est décomposé en même temps que l'oxyde, d'où il résulte du phosphore et du métal qui se combinent.

Si l'on chauffe un phosphate avec un excès de potassium; puis, qu'on mette le résidu en contact avec de l'eau, il se dégage du gaz phosphure d'hydrogène que l'on peut enflammer, et si, d'ailleurs, chauffé avec de l'acide sulfurique, le sel ne donne pas lieu à un dégagement de gaz hydrogène phosphoré qui s'enflamme, ce sel est un phosphate ou sa modification.

Phosphate de soude. — Ce sel est blanc, d'une saveur douce, verdit le sirop de violette, fond dans son eau de cristallisation, puis éprouve la fusion ignée et se transforme alors en un verre transparent de pyrophosphate. Exposé à l'air, il tombe en efflorescence. Il est très-soluble, plus à chaud qu'à froid, et cristallise en prismes obliques, à

bases rhombes. Il contient 1 atome d'acide, 2 atomes de base et 1 atome d'eau $= P^2O^5, 2NaO, H^2O$.

Phosphate de chaux. — La chaux et l'acide phosphorique forment trois combinaisons :

Phosphate neutre. — Ce sel est blanc, inodore, insipide, indécomposable par la chaleur, mais se fondant en un émail blanc, si la température est très-élevée ; il est insoluble dans l'eau et l'alcool, soluble dans les acides azotique, chlorhydrique et phosphorique, et s'obtient par la voie des doubles décompositions ; sa formule est $= P^2O^5, 3CaO$.

Phosphate basique des os. — Tous les os des animaux sont formés en grande partie par un sel composé de 3 atomes d'acide phosphorique et de 8 atomes de chaux ; il joue un grand rôle dans l'économie animale ; on l'emploie dans les laboratoires, dans les arts.

Biphosphate. — Blanc, sans odeur et d'une saveur piquante ; il verdit le sirop de violette ; à l'air, il ne s'altère pas. Chauffé, il fond, se décompose en perdant son ammoniaque, et passe à l'état d'acide pyrophosphorique vitreux qui contient toujours un peu d'ammoniaque ; l'eau le dissout mieux à chaud qu'à froid ; la liqueur chaude donne, par le refroidissement, des cristaux qui sont des prismes à quatre pans terminés par des pyramides à quatre faces. Ce phosphate possède la propriété de rendre incombustibles les étoffes que l'on plonge dans sa dissolution.

DES SULFATES.

L'acide sulfurique peut, en se combinant avec les bases, donner naissance à des sels acides neutres, ou avec excès de base. Exposés à l'action d'une forte chaleur, il n'y a que ceux de la première section et celui de magnésie qui ne se décomposent pas ; tous les autres se décomposent en donnant lieu à de l'acide sulfureux, de l'oxygène et plus ou moins d'acide sulfurique anhydre, qui se dégagent ; tandis que l'oxyde mis à nu absorbe de l'oxygène, s'il en est susceptible, ou en perd et se réduit, si le métal appartient aux deux dernières sections. Chauffé avec le charbon, leur acide est toujours décomposé, il n'y a que les oxydes de la deuxième section qui ne le soient pas. Dans tous les cas, le sulfate passe à l'état de sulfure ; tandis que le charbon combiné avec l'oxygène se dégage à l'état d'acide carbonique ou d'oxyde de carbone.

L'eau dissout beaucoup de sulfates ; ceux de baryte, de plomb, les sous-sulfates d'antimoine, de bismuth et de mercure sont insolubles ; tous les autres sont plus ou moins solubles.

Caractères génériques. — Lorsqu'un sel donné, traité par l'acide sulfurique, ne laissera pas dégager d'acide sulfureux ; que traité par une dissolution d'azotate de baryte, soit à froid, soit à chaud, il donnera lieu à un précipité blanc qui, lavé, séché et calciné avec du charbon, se transformera en sulfure dont la saveur est la même que celle des œufs pourris, ou qui donnera un abondant dégagement de gaz sulfhydrique par l'acide chlorhydrique, ce sel sera toujours un sulfate. Le réactif le plus sensible pour reconnaître un sulfate en dissolution est l'eau de baryte, qui y fait naître instantanément un précipité blanc, insoluble dans l'acide nitrique.

Les sulfates neutres sont composés de 1 atome d'acide et de 1 atome de base contenant 1 atome d'oxygène $= RO, SO^3$.

Sulfate de potasse. — Blanc, amer, cristallisant en prismes, inaltérable à l'air, ne contient pas d'eau de cristallisation, mais bien de l'eau d'interposition, ce qui le fait décrépiter au feu, fusible au-dessus du rouge-cerise. Il est formé de 1 atome d'acide et de 1 atome de potasse $= KO, SO^3$.

On l'emploie en médecine et dans les arts pour faire l'alun.

Sulfate de soude. — Incolore, très-amer, cristallisant en longs prismes très-transparents, s'effleurissant facilement à l'air, fusible au-dessus de la chaleur rouge; il est très-soluble. L'eau à 100 degrés dissout moins de ce sel que l'eau à 33 degrés, en sorte que son maximum de solubilité est à 33 degrés.

On l'emploie en médecine et dans les arts. Il sert à faire la soude artificielle; on s'en sert dans la fabrication des verres à vitres.

Sulfate de chaux. — Incolore, insipide, tantôt amorphe, tantôt cristallisé, attirant l'humidité sans être déliquescent : soumis à l'action d'une forte chaleur, il se fond en émail blanc; il est peu soluble dans l'eau; il se dissout mieux si l'on y ajoute de l'acide sulfurique. La nature nous l'offre en abondance tantôt hydraté, tantôt anhydre. Dans le premier cas, sa formule est $(Ca, O, SO^3) + H^2O^2$; dans le second (Ca, O, SO^3).

C'est en calcinant le sulfate de chaux hydraté que l'on se procure du plâtre; on s'en sert beaucoup dans les constructions.

Sulfate de magnésie. — Blanc, styptique, amer, très-soluble dans l'eau, plus à chaud qu'à froid; cristallise en prismes rhomboïdaux transparents, efflorescent, contenant de l'eau de cristallisation. Soumis à l'action de la chaleur, il éprouve la fusion aqueuse et non la fusion ignée. Il contient 7 atomes d'eau $= (MgO, SO^3) + 7H^2O$.

On l'emploie en médecine.

Sulfate d'alumine et de potasse ou d'ammoniaque. — MM. Vauquelin, Chaptal et Decroisille ont reconnu que le sulfate d'alumine était un sel double ayant pour base, tantôt du sulfate de potasse, et tantôt du sulfate d'ammoniaque. L'alun à base de potasse est blanc, astringent, rougissant la teinture de tournesol; soluble dans l'eau, moins à froid qu'à chaud; il cristallise en octaèdres transparents et légèrement efflorescents. Si la dissolution contient un excès d'alumine, il cristallise en cubes, ce qui le fait nommer *alun cubique*.

L'alun à base d'ammoniaque possédant les mêmes propriétés que le précédent, s'en distingue en ce que, calciné, toute l'ammoniaque se dégage et il ne reste plus que de l'alumine, et en ce que, traité par la potasse ou la soude, il se fait un dégagement d'ammoniaque facile à reconnaître par son odeur.

Ce sel est formé de 1 atome de sulfate d'alumine, de 1 atome de sulfate de potasse et de 24 atomes d'eau, d'où la formule

$$(KO, SO^3) + (Al^2O^3, 3SO^3) + 24H^2O.$$

L'alun est très-employé dans la teinture; il sert à fabriquer plusieurs laques : on l'emploie pour préserver les peaux et les fourrures des attaques des insectes, pour conserver les pièces d'anatomie, pour aluner le papier, etc.

Sulfate de protoxyde de fer. — Ce sel est styptique, non vénéneux, soluble à peu près dans les trois quarts de son poids d'eau bouillante, et seulement dans deux fois son poids d'eau à la température ordinaire. Il cristallise en prismes rhomboïdaux, verts, transparents, qui contiennent 45 centièmes d'eau, s'effleurissent et, par conséquent, éprouvent la fusion aqueuse. Desséché ou soumis à l'action d'une chaleur rouge, il se décompose et l'on en retire du gaz oxygène, du gaz acide sulfureux, un liquide très-dense et très-acide, et du tritoxyde de fer.

Ce sel contient 6 atomes d'eau $= (FeO, SO^3) + 6H^2O$.

On s'en sert dans la préparation des teintures en noir, de l'encre, du bleu de Prusse, du colcothar, et à précipiter l'or en poudre de sa dissolution dans l'eau régale, poudre qui est employée pour dorer sur la porcelaine.

Sulfate de sesquioxyde. — Jaune-orangé, acerbe, styptique, non cristallisable, rougit la teinture de tournesol. On ne l'emploie que combiné en petites proportions avec l'autre pour les teintures ou pour réactifs en chimie.

Sa formule est (Fe^2O^3, SO^3).

Sulfate de bioxyde de cuivre. — Le protoxyde de cuivre ne peut pas se combiner à l'acide sulfurique sans se décomposer en cuivre et en bioxyde qui se combine à l'acide.

Le sulfate de cuivre est d'une belle couleur bleue, d'une saveur très-styptique, cristallisant en beaux prismes obliques, à base parallélogramme obliquangle, transparents, qui contiennent de l'eau de cristallisation, s'effleurissent un peu, se fondent à une douce chaleur, puis blanchissent en se desséchant; enfin se décomposent à une chaleur plus forte. Il est décomposable par la potasse, la soude, l'ammoniaque, etc. Ce sel est formé de 1 atome de bioxyde de cuivre, de 1 atome d'acide et de 5 atomes d'eau $= (CuO, SO^3) + 5H^2O$.

Il sert à préparer le vert de Scheele et les cendres bleues; on l'emploie aussi en médecine.

DES AZOTATES.

Tous les azotates se décomposent au feu. Les uns donnent d'abord de l'oxygène et se transforment en azotites; puis, quand la chaleur est plus élevée, il se dégage à la fois de l'oxygène, de l'azote, un peu d'acide hypoazotique, et passent à l'état d'oxydes. Tous les azotates dont l'oxyde a beaucoup d'affinité pour l'acide sont dans ce cas. Les autres donnent immédiatement lieu à un dégagement d'oxygène, d'acide hypoazotique, et l'oxyde reste libre, suroxydé ou réduit, selon qu'il est ou non susceptible d'être altéré. Si l'acide avait peu d'affinité, et si le sel ne pouvait être obtenu sans eau, alors l'acide azotique se volatiliserait sans se décomposer. Si on le met sur des charbons ardents, il fuse comme les chlorates.

La plupart des métalloïdes peuvent les décomposer en s'emparant de l'oxygène de l'acide : l'acide sulfurique en dégage l'acide azotique à la température ordinaire; les acides phosphorique, arsénique, etc., à une température un peu élevée. Enfin l'acide chlorhydrique le décompose en partie et forme de l'eau régale.

Les azotates sont solubles dans l'eau ou dans un excès d'acide.

Caractères génériques. — On reconnaît qu'un sel est un azotate toutes les fois que, mis en contact avec les charbons, il fuse ; que l'acide sulfurique concentré, froid ou chaud, en fait dégager des vapeurs blanches, piquantes, et qu'en ajoutant au mélange de la tournure de cuivre et un peu d'eau, il se produit des vapeurs rouges.

Dans les azotates neutres, l'oxygène de l'acide est à celui de la base comme $5 : 1 = RO\,(Az^2O^5)$.

Nous ne parlerons ici que des azotates de potasse et d'argent, les autres étant inusités.

Azotate de potasse. — Ce sel est blanc, d'une saveur fraîche et piquante, cristallisant en longs prismes à six pans transparents et cannelés. Il n'éprouve rien à l'air, à moins qu'il ne soit chargé d'humidité. Soumis à une chaleur de 350 degrés, il fond, et si on le coule en plaques minces, refroidi, il constitue le *cristal minéral* ou *sel de prunelle*. En chauffant davantage, il laisse dégager de l'oxygène et passe à l'état d'azotite, et enfin de potasse. Pulvérisé avec le tiers de son poids de soufre et les deux tiers de son poids de potasse de commerce, on obtient une poudre fulminante très-énergique. Réduit en poudre, puis mélangé avec du charbon et du soufre en proportions convenables, on obtient la poudre à canon.

On emploie ce sel, qu'on nomme aussi *sel de nitre*, à la fabrication des acides nitrique et sulfurique et à la préparation de l'antimoine diaphorétique, du fondant de Rotrou, des flux blanc et noir, etc.

Azotate d'argent. — Incolore, d'une saveur âcre, amère, très-caustique. Il est inaltérable à l'air, cristallise en lames minces très-larges ; il est soluble dans l'eau, et donne une dissolution qui produit sur la peau des taches violettes qui ne disparaissent qu'avec la peau. Le chlore ou les chlorures y font naître un beau précipité blanc, caillebotté de chlorure d'argent. Soumis à une faible chaleur, il se boursoufle, éprouve la fusion ignée, et si on le coule dans une lingotière, on obtient ce que l'on nomme *pierre infernale*. Chauffé à une température plus élevée, il se décompose entièrement et l'argent se réduit. La potasse ou la soude en précipite un oxyde de couleur olive qui, mis en contact avec l'ammoniaque liquide, puis évaporé, donne lieu à une masse appelée *argent fulminant*.

DES CHLORATES.

Les chlorates sont décomposés par le feu : ceux de la deuxième section en donnant lieu à de l'oxygène, du chlore et un oxyde, et tous les autres à de l'oxygène et à un chlorure. Mis sur les charbons ardents, ils en activent la combustion par leur oxygène, et l'on dit alors que le sel fuse. Tous les corps combustibles avides d'oxygène décomposent ces sels si subitement, qu'il en résulte une détonation plus ou moins forte. Le mélange de ces corps avec les chlorates constitue ce que l'on nomme *poudre fulminante*. L'eau dissout tous les chlorates, excepté le chlorate de protoxyde de mercure : leur dissolution n'est point troublée par l'azotate d'argent, ce qui les distingue des chlorures : dans les chlorates neutres, l'oxygène de l'acide est à celui de la base comme $5 : 1 = RO, Cl^2O^5$.

Caractères génériques. — Si un sel projeté sur des charbons ardents

en active la combustion ; si, exposé à l'air, il ne répand aucune odeur de chlore ; si, traité par l'acide sulfurique, il dégage un gaz jaune, d'odeur forte et analogue au chlore ; si enfin sa dissolution n'est pas troublée par l'azotate d'argent, on aura la certitude que l'on a un chlorate.

Chlorate de potasse. — C'est le seul des chlorates employés ; il est blanc, d'une saveur fraîche, un peu acerbe, cristallisant en lames rhomboïdales. Il fond au-dessous de la chaleur rouge, puis bout et se décompose en oxygène et en hyperchlorate qui ne se décompose qu'à une bien plus haute température. Si on le mêle à un corps combustible, le soufre par exemple, puis, que l'on y verse une goutte d'acide sulfurique concentré, il en résulte une vive combustion due à la décomposition subite de l'acide chlorique : aussi cette propriété est-elle mise à profit dans la fabrication des allumettes oxygénées. Ce sel ne contenant pas d'eau, sa formule est $KO, Cl^2 O^5$.

On s'en sert pour obtenir l'oxygène et le deutoxyde de chlore, pour faire les allumettes oxygénées et pour faire des poudres fulminantes dont on se sert comme amorce dans les fusils à piston.

Hypochlorites (chlorites, chlorures d'oxyde). — Les hypochlorites ont une odeur de chlore, une saveur particulière ; ils détruisent les couleurs bleues végétales. Ceux qui sont connus sont solubles dans l'eau, et la dissolution possède la propriété décolorante au plus haut degré. Tous sont décomposés par la chaleur ; il se dégage du chlore, et le sel se transforme en chlorate quand la chaleur est appliquée à la dissolution ; il se dégage du chlore et de l'oxygène si la chaleur est directe : alors il reste un chlorure. Exposés à l'air, ils laissent dégager du chlore ; c'est qu'alors l'acide carbonique de l'air s'unit à l'oxyde et met l'acide hypochloreux à nu : celui-ci réagissant sur le chlorure qui accompagne toujours l'hypochlorite, en oxyde le métal pendant que le chlore du chlorure et celui de l'acide se dégagent ; l'oxyde formé, au contraire, se combine avec l'acide carbonique de l'air.

Tous les acides agissent sur eux de la même manière que l'acide carbonique. Trois hypochlorites sont employés : ce sont ceux de chaux, de soude et de potasse.

Hypochlorite de soude. — On l'emploie à l'état liquide ; on l'obtient par voie de double décomposition, en traitant l'hypochlorite de chaux par le carbonate de soude, et filtrant. Ordinairement on fait une dissolution faible de carbonate de soude, et l'on y fait arriver un courant de chlore ; une partie de carbonate passe à l'état de bicarbonate de soude ; l'autre devient soude ; c'est avec elle que se passe toute la réaction. Cette soude se divise en deux parties : l'une qui cède 1 atome d'oxygène à 2 atomes de chlore, pour former l'acide hypochloreux qui se combine à la soude non décomposée : l'atome de soude qui a perdu son oxygène se combine à 2 atomes de chlore pour former un chlorure ; de plus, il se fait souvent un peu de chlorate. Il résulte de cette réaction que ce sel est un mélange d'hypochlorite, de bicarbonate de soude, de chlorure de sodium, et souvent d'un peu de chlorate de soude.

Hypochlorite de potasse. — En substituant dans l'opération précédente une dissolution de carbonate de potasse à celle de carbonate de soude, on obtient le liquide connu sous le nom d'*eau de javelle*.

Hypochlorite de chaux. — Ce sel est solide sous forme de poudre, mais il n'est employé qu'en dissolution ou divisé dans l'eau. On s'en sert pour blanchir les tissus divers, le papier, pour désinfecter les amphithéâtres d'anatomie, les lieux d'aisances, etc.

DES CHLORURES.

Les chlorures se comportent de différentes manières quand on les expose à l'action du feu. Les chlorures d'or, de platine, de rhodium, se décomposent complétement; d'autres, tels que le bichlorure de cuivre, passent à un état moindre de chloruration; enfin d'autres se fondent, tels sont les chlorures alcalins, et beaucoup sont volatils.

L'eau dissout la plupart des chlorures; mais quelques-uns, comme les chlorures de quelques métaux acidifiables, la décomposent en donnant lieu à de l'acide chlorhydrique et à un acide métallique. Le chlorure d'argent, le protochlorure de mercure, etc., sont complétement insolubles.

L'acide sulfurique les décompose en dégageant de l'acide chlorhydrique, et formant un sulfate; l'acide azotique les décompose en partie, et forme de l'eau régale.

Caractères génériques. — Toutes les fois qu'un sel traité par l'acide sulfurique fait effervescence et répand dans l'air des vapeurs blanches et piquantes; que, traité par le bioxyde de manganèse et l'acide sulfurique, il donne lieu à un dégagement de chlore; que dissous, s'il en est susceptible, et par de l'azotate d'argent, il forme un précipité caillebotté, soluble dans l'ammoniaque et insoluble dans l'acide azotique, on en conclura que ce sel est un chlorure.

Les chlorures sont composés de manière qu'ils correspondent aux oxydes d'un même métal, d'où il résulte que 2 atomes de chlore équivalent à 1 atome d'oxygène; un chlorure qui correspond à un protoxyde, formé de 1 atome d'oxygène, doit contenir 2 atomes de chlore $= RCl^2$.

Chlorure de sodium (sel marin, sel de cuisine). — Ce sel est blanc, d'une saveur qui plaît à beaucoup d'animaux, et qui est caractéristique; il est inaltérable à l'air, à moins qu'il ne contienne des sels qui le rendent déliquescent; il ne contient que de l'eau d'interposition, ce qui fait qu'il décrépite quand on le chauffe à la chaleur rouge; il entre en fusion et se volatilise si la température est très-élevée. Sa formule est $= NaCl^2$.

L'eau dissout, à peu de chose près, autant de sel à froid qu'à chaud.

Tout le monde connaît les usages du sel : en chimie, on s'en sert pour préparer le chlore; dans les arts, pour obtenir la soude artificielle, l'acide chlorhydrique, les hypochlorites, etc.

L'usage du sel comme aliment est presque aussi indispensable que l'air que les animaux respirent; il paraît être un des agents principaux de la nutrition. Sous l'influence vitale, il serait décomposé en acide chlorhydrique que l'on retrouve dans l'estomac, et qui serait nécessaire pour opérer la dissolution des aliments solides, et en soude, qui, combinée avec l'acide carbonique, joue un rôle important dans les phénomènes de la vie.

Chlorure de barium. — Ce sel est âcre, très-piquant, vénéneux, inaltérable à l'air, soluble dans l'eau, plus à chaud qu'à froid, cristallisant par le refroidissement en prismes à quatre pans très-larges et peu épais. Exposé au feu, il décrépite et fond. Mis en contact avec une eau qui contienne la plus petite quantité d'un sulfate, il y occasionne un précipité blanc de sulfate de baryte. Sa formule $= BaCl^2$.

Chlorure de calcium. — Ce sel est âcre, piquant, amer, très-déliquescent, ce qui fait qu'on l'emploie pour dessécher les gaz. Chauffé, il fond, et donne lieu à un solide qui, frotté, paraît lumineux à l'obscurité, et que l'on nomme *phosphore de Homberg*.

Chlorure d'étain. — Ce sel est anhydre, liquide, transparent, très-limpide, très-volatil, d'une odeur piquante et insupportable, d'une saveur très-caustique. Exposé à l'air, il s'y vaporise, et y répand des fumées très-épaisses. Mis en contact avec un peu d'eau, il cristallise en donnant lieu à un petit bruit et à de la chaleur, due à son avidité pour l'eau. Il se dissout entièrement dans une assez grande quantité d'eau; sa formule $= SnCl^4$.

Protochlorure d'antimoine. — Ce sel est blanc, demi-transparent, très-caustique, paraissant onctueux; fusible au-dessous de la chaleur de l'eau bouillante, et cristallisant en tétraèdres par le refroidissement. Exposé à une chaleur au-dessous du rouge, il se volatilise. A l'air, il se résout en liqueur, en absorbant l'humidité que contient ce fluide. Mis en contact avec l'eau en assez grande quantité, il en résulte un précipité blanc de protoxyde d'antimoine et une liqueur contenant de l'acide chlorhydrique et du protochlorure non décomposé. On l'emploie pour bronzer les métaux, pour obtenir l'oxychlorure d'antimoine, ce qui se fait en le versant dans huit fois son poids d'eau.

Chlorure de mercure. — Ce sel est blanc, insipide, volatil sans décomposition, inaltérable à l'air; insoluble dans l'eau, cristallisable par voie de sublimation en prismes quadrilatères. La lumière le noircit; il ne se dissout pas dans l'acide chlorhydrique, mais bien dans le chlore; alors il passe à l'état de bichlorure. Mis en contact avec une dissolution alcaline, il noircit et se transforme en oxyde de mercure. Sa formule est $= HgCl$.

Le bichlorure ou sublimé corrosif est blanc, inaltérable à l'air, d'une saveur styptique désagréable, très-vénéneux. Il se vaporise sans altération, et cristallise en petites aiguilles prismatiques. Cette vapeur a pour caractère de blanchir une lame de cuivre. Sa formule $= HgCl^2$. Le sublimé est un médicament précieux contre les maladies syphilitiques. On s'en sert aussi pour conserver les matières animales.

Chlorures d'or (protochlorure). — Le protochlorure est un sel légèrement jaune, décomposable par la chaleur en or et en chlore, insoluble dans l'eau froide, et se transformant en or et en trichlorure par l'eau bouillante. Sa formule $= AuCl$.

Trichlorure. — Sous forme de masse cristalline, d'une couleur rouge intense. Exposé au feu, il commence par fondre, puis se décompose complétement; il est déliquescent et très-soluble dans l'eau. Combiné à l'acide chlorhydrique, il forme le chlorhydrate de trichlorure, qui

est un sel jaune pâle, en aiguilles cristallines, d'une saveur très-styptique et très-désagréable. Desséché dans le vide, il se colore en vert. Exposé au feu, il abandonne d'abord son acide chlorhydrique, puis se décompose en or et en chlore. L'eau le dissout parfaitement.

Chlorures de platine (protochlorure). — Le protochlorure de platine se présente sous forme de poudre grise verdâtre; ce sel est insoluble dans l'eau; décomposable par une chaleur rouge.

Bichlorure. — D'une couleur rouge-orangé, cristallisant en prismes; il est déliquescent, soluble dans l'eau et l'alcool. Sa dissolution aqueuse concentrée est rouge-brun; elle n'est que jaune si elle est étendue.

Quand on verse de l'ammoniaque dans la dissolution concentrée, on obtient un précipité de chlorhydrate de platine et d'ammoniaque, qui, calciné, laisse pour résidu le platine sous forme d'éponge. On l'obtient en dissolvant le platine dans l'eau régale.

Chlorure de cobalt. — Ce sel est sous forme d'écailles gris de lin, lorsqu'il est anhydre. Chauffé à l'abri du contact de l'air, il peut être volatilisé. Il possède une saveur très-styptique; soluble dans l'eau : si sa solution est concentrée, elle a une belle couleur bleue; étendue, elle passe au rose. Cette dissolution, convenablement évaporée, donne des cristaux rouge-rubis de chlorure hydraté. L'alcool le dissout. Lorsque la dissolution n'est que rose, si l'on trace des caractères sur le papier, en séchant ils disparaissent; mais si on les chauffe, ils apparaissent sur-le-champ, et deviennent bleus, en perdant une portion de l'eau qu'ils contiennent. Par le refroidissement, ils disparaissent peu à peu, parce qu'ils reprennent à l'air un peu d'humidité. Si on les chauffait trop fort, la couleur noire qui se forme ne disparaîtrait plus par le refroidissement. Cette dissolution porte le nom d'*encre de sympathie*.

CHLORHYDRATES.

Chlorhydrate d'ammoniaque. — Ce sel est blanc, doué d'une saveur piquante, soluble dans moins de 3 parties d'eau à 15 degrés, et dans une moindre quantité d'eau bouillante. Il cristallise en longues aiguilles qui se groupent sous forme de barbes de plumes. Soumis à l'action du feu, il fond dans son eau de cristallisation, bout, et se sublime sous forme de vapeurs blanches. Chauffé avec de la craie, il se dégage du carbonate d'ammoniaque, et il reste du chlorure de calcium.

On se sert de ce sel pour faire l'ammoniaque; le carbonate d'ammoniaque sert pour décaper les métaux.

SILICATES.

Aucun silicate n'est décomposable par la chaleur; seulement les uns sont facilement fusibles, d'autres sont difficiles à fondre, enfin d'autres sont totalement infusibles.

Le charbon n'attaque ni les silicates alcalins, ni les silicates terreux. Il transforme, au contraire, les silicates de manganèse et de fer en siliciures. Probablement d'autres silicates éprouveraient une semblable transformation. L'eau ne dissout que les silicates de potasse et de

soude basiques. Tous les silicates sont attaqués par l'acide fluorhydrique : il se forme alors de l'eau et de l'acide fluosilicique; aussi se sert-on de cet acide pour attaquer le verre. Parmi les autres acides, il n'y a que les acides borique et phosphorique qui les attaquent, encore faut-il que la température soit très-élevée.

Les silicates neutres sont ceux chez lesquels le rapport de l'oxygène de l'oxyde est à celui de la base comme 1 : 3 = RO, SiO^3.

VERRES.

Les combinaisons de l'acide silicique avec les bases portent le nom de *verres*. Il y a plusieurs sortes de verres.

Verre soluble. — C'est un silicate de potasse ou de soude qui jouit de la propriété de pouvoir être appliqué comme un vernis sur les bois et les tissus inflammables, et de les rendre incombustibles.

Ce verre est solide, incolore et fusible, d'une saveur alcaline, rougissant le papier de curcuma. A l'air, il se fendille, s'effleurit un peu en attirant l'humidité. L'eau ne le dissout bien que quand elle est bouillante. Cette dissolution concentrée est visqueuse, et peut se tirer en fils très-fins comme le verre fondu. Si elle est étendue, elle se trouble à l'air; le précipité qui se forme est de l'acide silicique, pendant que la potasse absorbe l'acide carbonique de l'air.

Verre de Bohême et crown-glass. — Ce verre est composé d'acide silicique et de potasse; il contient en outre de faibles quantités de chaux et d'alumine; il est incolore, léger, sans bulles et très-limpide. On en fait des vitres, on en couvre les dessins encadrés, etc. Le crown-glass a une composition analogue; il est employé à fabriquer les lunettes de spectacle, les lunettes grossissantes et les instruments d'astronomie.

Verre à vitres. — Ce verre est tantôt blanc, tantôt demi-blanc ou vert. En France, on le fabrique avec le sulfate de soude et la chaux en quantités variables, mais telles, que la silice contienne quatre fois l'oxygène des bases. On se sert avec avantage, pour fabriquer le verre vert, de la cendre de bois lavée, dont l'alcali plus pur est employé pour faire du verre blanc. Cette cendre lessivée contient du silicate de potasse, combiné avec des silicates de chaux et d'alumine, qui se convertit en verre par l'addition du sable. Ces substances, réduites en poudre fine, sont mêlées ensemble, puis calcinées jusqu'à ce qu'elles soient agglutinées en une seule masse. Alors on la fait fondre dans des creusets, au milieu d'un fourneau particulier, jusqu'à ce que le verre soit parfaitement fondu et sans bulles. On l'écume pour enlever le *fiel de verre* qui vient nager à la surface; puis on le travaille. Si, pendant qu'il est mou, on l'allonge très-rapidement, on obtient des fils aussi fins que la soie; avec ces fils on peut faire des aigrettes très-brillantes, et même fabriquer des tissus.

Verre à glaces. — Ce verre ne diffère du précédent que par une proportion plus forte d'acide silicique qui contient six fois l'oxygène des bases.

Verre à bouteilles. — Il se prépare d'après des doses différentes, selon les fabriques. La composition suivante donne un verre qui fond plus vite et est plus avantageux, mais il donne plus de fiel de verre :

Sable jaune 100 parties, soude brute de varech 200 parties, cendres neuves 50 parties, fragments de bouteilles 100 parties.

Cristal. — C'est un silicate double de potasse et de plomb, plus dense, plus facile à tailler, et doué d'un pouvoir réfringent plus grand que le verre ordinaire. On le choisit incolore et limpide. Pour arriver à l'avoir beau, il faut faire un choix scrupuleux des substances qui le composent. On connaît plusieurs dosages; le suivant donne un très-beau produit : sable pur, 300 parties; minium, 200; carbonate de potasse pur, 100; groisil, 300; oxyde de manganèse, 0,45; acide arsénieux, 0,60.

Flint-glass. — On l'obtient en fondant ensemble 120 parties de sable blanc, 35 de potasse, 40 de minium, 13 de nitre, 6 d'arsenic blanc et $\frac{1}{2}$ de manganèse. Le strass a une composition analogue, seulement il est plus riche en plomb. Le premier sert à faire des lentilles et à achromatiser d'autres verres; le second sert à imiter les pierres fines, imitation à laquelle on parvient en le colorant avec divers oxydes.

ÉMAUX.

Les émaux sont de deux espèces : les émaux transparents, qui sont des verres à bases de plomb ordinairement colorés par des oxydes, et les émaux opaques, qui contiennent en outre du bioxyde d'étain combiné au plomb à l'état de stannate; ce sont surtout ces derniers qui portent le nom d'émaux.

DES CHAUX, DES MORTIERS ET DES BÉTONS.

On appelle *pierre à chaux*, celle qui contient le carbonate de chaux, lequel, soumis à une température suffisamment élevée, perd son acide carbonique et fournit la chaux. Les pierres calcaires se convertissent en chaux par la calcination, elles font effervescence quand on en jette un fragment dans l'acide azotique.

Les chaux ont la propriété de servir de base dans les mortiers, bétons et ciments employés dans les constructions, et de se combiner, au moyen de l'eau, à la silice que contient le sable. La combinaison chimique de la chaux avec le sable et l'absorption de l'acide carbonique de l'air et de l'évaporation de l'eau ont pour effet de faire durcir le mortier et de le faire adhérer aux matériaux de construction, de manière à constituer une seule masse.

Il y a plusieurs sortes de chaux :

1°. La *chaux grasse*. Son volume augmente à l'extinction depuis un tiers de son volume primitif jusqu'à deux fois et demie ce volume; on l'emploie pour les maçonneries ordinaires, mais elle ne vaut rien pour les travaux hydrauliques ou souterrains, attendu qu'elle ne durcit qu'imparfaitement; mise en contact avec l'eau, elle développe de la chaleur au point de mettre l'eau en ébullition, elle foisonne et se réduit en une pâte blanche; il se dégage des vapeurs légèrement caustiques.

La chaux grasse mise dans un volume d'eau indéfini se combine rapidement avec un poids d'eau à peu près égal aux 22 centièmes du sien; retirée et exposée à l'air, elle fuse avec dégagement de chaleur en se réduisant en poudre. Cette matière ainsi obtenue, et qu'on

appelle *hydrate de chaux*, peut encore absorber une grande quantité d'eau, mais il n'y a plus alors ni combinaison, ni dégagement de chaleur.

Les mortiers de cette chaux restent mous quand on les prive du contact de l'air ou plutôt de l'acide carbonique; la solidification de la chaux n'est due qu'à l'absorption de cet acide. D'après M. Vicat, 100 parties de chaux grasse absorbent en se solidifiant 74 parties d'acide carbonique et en retiennent 17 d'eau.

2°. La *chaux maigre*. La chaux maigre est celle qui ne foisonne pas à l'extinction et elle durcit assez vite à l'air; il y en a qui est hydraulique et d'autre qui ne l'est pas; à défaut d'autre, quand elle n'est pas hydraulique, on l'emploie aux mêmes usages que la chaux grasse.

3°. La *chaux hydraulique*. M. Vicat, inspecteur général des ponts et chaussées, a découvert les propriétés si importantes des chaux hydrauliques; il les divise en trois classes, suivant le degré de capacité de leur durcissement, qu'il regarde comme consommé dès que la chaux en pâte supporte sans dépression sensible une aiguille à tricoter de 0,0012 de diamètre limée carrément à son extrémité et chargée d'un poids de $0^{kil},30$; lorsqu'elle a acquis cette consistance, la chaux résiste au doigt poussé avec la force ordinaire du bras, et elle ne peut plus changer de forme sans se briser. Ces trois sortes de chaux sont :

La chaux *moyennement hydraulique ;*

La chaux *hydraulique ;*

La chaux *éminemment hydraulique.*

La première fait prise au bout de quinze à vingt jours d'immersion ; la seconde ne demande que six à huit jours, et la troisième acquiert le degré de dureté nécessaire du deuxième au quatrième jour.

Dans les pierres calcaires qui sont propres à fournir de la chaux hydraulique, la quantité d'argile est comprise entre le neuvième et le quart du carbonate de chaux, soit de 10 à 20 parties d'argile pour une quantité de chaux variant entre 90 et 80; toutes choses égales d'ailleurs, la propriété hydraulique est d'autant plus développée que la proportion indiquée se rapproche plus de la dernière limite. Mais si l'argile dépasse 25 pour 75 parties de carbonate, le résidu de la calcination ne fuse plus quand on le met en contact avec l'eau, et ne peut plus être, à proprement parler, considéré comme une chaux. Si cependant on le gâche, après l'avoir réduit mécaniquement en poudre fine, il fait prise avec une grande promptitude, soit à l'air, soit à l'eau, et acquiert en peu de temps une très-grande dureté. Une pareille propriété est de nature à rendre de précieux services dans la construction des ouvrages immergés; ce produit est désigné sous les noms de *ciment romain, ciment Parker, ciment de Pouilly*, *etc.* M. Vicat le désigne sous le nom de *ciment naturel*, et il appelle *chaux limites* des produits compris, sous le rapport de la proportion d'argile, entre les chaux hydrauliques et les ciments, et qui forment, pour ainsi dire, le passage des unes aux autres.

Enfin, quand la quantité proportionnelle d'argile dépasse 65 pour 35 de carbonate de chaux, le produit de la calcination, à quelque degré qu'elle ait été poussée, est complétement incapable de durcir seul dans quelque condition qu'on le place; il ne peut plus être utile-

ment employé que dans la fabrication des mortiers et en qualité de pouzzolane.

Composition des diverses espèces de chaux. — L'analyse a fait reconnaître que le carbonate de chaux qui fournissait la chaux grasse contenait moins de $\frac{1}{10}$ de matières étrangères; qu'au-dessus de $\frac{1}{10}$ il donnait une chaux d'autant plus maigre que cette proportion de matières étrangères était plus grande; que la propriété hydraulique était due à la formation, à un grand feu, du silicate de chaux, c'est-à-dire que la silice jouait un rôle essentiel dans la combinaison, mais que cette combinaison n'avait lieu qu'autant que la silice se trouvait en gelée ou réduite à un état de ténuité extrême dans son mélange avec le carbonate de chaux. On a reconnu de plus que la magnésie et l'oxyde de fer rendent la chaux maigre non hydraulique, et que la silice pure ou mélangée d'alumine lui communique la propriété hydraulique.

Recherche de la chaux hydraulique. — La chaux hydraulique est fournie par la simple cuisson du calcaire qui contient les éléments de cette chaux. Dans les localités où ce calcaire n'existe pas, on fabrique cette chaux en faisant un mélange intime de tous les éléments qui doivent entrer dans sa composition. On conçoit qu'on ne doit avoir recours à ce second mode de fabrication qu'à défaut de carbonate hydraulique naturel.

Lorsqu'on aura besoin de se procurer de la chaux hydraulique dans une localité, on devra se guider dans ses recherches en se rappelant que c'est le mélange de l'argile au carbonate calcaire, qui fournit toutes les variétés de chaux hydrauliques, et que, par conséquent, les carrières où alternent les bancs d'argile et de pierre calcaire sont celles où il y a le plus de chances de succès, quand ces bancs font partie d'une même formation.

Si, en traitant le calcaire par l'acide chlorhydrique, toute la masse se dissout, on est sûr qu'il ne peut fournir qu'une chaux grasse; si, au contraire, il reste un produit insoluble, on doit s'attendre à obtenir une chaux maigre; mais pour savoir si elle est hydraulique ou non, il faut faire cuire un échantillon de cette pierre, excepté quand le résidu est un sable grossier, car alors on est sûr que la chaux ne vaudra rien; cependant, comme les chaux maigres non hydrauliques sont rares, en comparaison de celles qui sont hydrauliques, il y a espoir de succès dès qu'on obtient ces résidus insolubles.

Chaux hydraulique artificielle. — Les précieux travaux de M. Vicat l'ont conduit à essayer et à propager la fabrication des chaux *hydrauliques artificielles*, par le mélange intime des divers éléments reconnus essentiels dans la composition des chaux hydrauliques naturelles. Deux procédés différents sont mis en usage pour cette préparation. Le plus parfait, mais aussi le plus dispendieux, consiste à mêler de la chaux grasse et déjà cuite, d'une manière quelconque, avec une certaine proportion d'argile, à réduire le mélange en pains et à le soumettre à une nouvelle cuisson; c'est ainsi que s'obtient la chaux artificielle dite de *double cuisson*.

Dans le second procédé, on réduit en poudre un calcaire plus ou moins argileux; on y ajoute la dose d'argile que des essais chimiques ou une cuisson préalable ont montrée nécessaire pour réunir les

proportions propres à fournir la chaux hydraulique que l'on veut produire; puis, après un mélange aussi intime que possible, on réduit le tout en pâte avec de l'eau, et l'on soumet à la cuisson. Cette méthode exige d'abord que l'on fasse choix d'un calcaire qui puisse être facilement broyé, de la *craie* par exemple, ou du *calcaire marneux;* en outre, le mélange qui s'opère au moyen de manéges semblables à ceux que l'on emploie sur les grands chantiers de construction à la fabrication du mortier, paraît devoir toujours être plus complet dans le premier système que dans le second, et ce dernier est regardé comme inférieur à l'autre, quant à la qualité des produits; mais la raison de dépense le fait néanmoins préférer, toutes les fois que la nature du calcaire disponible le permet.

Conservation de la chaux. — Pour conserver la chaux, il faut avoir soin, soit à la fabrique, soit sur le chantier, de la mettre à l'abri sous des hangars, ou mieux dans des caisses ou tonneaux hermétiquement fermés; avec cette dernière précaution, on peut conserver la chaux au moins une année, sans qu'elle ait perdu sensiblement de ses qualités.

Extinction de la chaux. — Cette opération se fait de quatre manières différentes :

1°. *Extinction par fusion* ou *extinction ordinaire.* Elle se fait en plaçant la chaux dans des bassins, avec une quantité d'eau convenable pour la réduire en bouillie épaisse.

2°. *Extinction par immersion.* Cette méthode consiste à réduire la chaux vive en petits morceaux de la grosseur d'une noix, et à la jeter dans un panier à claire-voie, que l'on plonge dans l'eau en l'y tenant jusqu'à ce que la superficie de l'eau commence à bouillonner; alors on le retire, on le laisse égoutter un instant, et l'on verse la chaux dans des caisses ou futailles, où la chaleur se trouve concentrée. Une grande partie de l'eau ne pouvant s'échapper, elle est reprise par la chaux, qui se réduit en poudre, et que l'on transforme ensuite en pâte. Ce procédé étant coûteux, on l'emploie rarement.

3°. *Extinction par aspersion.* Cette méthode consiste à placer la chaux vive dans un bassin circulaire, que l'on forme avec du sable, à jeter dessus une quantité d'eau suffisante pour la réduire en pâte, à la couvrir immédiatement avec le sable, et à ne l'agiter et faire le mortier que quand la fusion est complète. Pour la chaux grasse, il se produit un dégagement de chaleur qui facilite l'extinction, laquelle est complète au bout de deux à trois heures.

4°. *Extinction spontanée.* Ce procédé consiste à soumettre la chaux vive à l'action lente et continue de l'atmosphère, dont elle absorbe l'humidité en se transformant en hydrate de chaux. Cet hydrate contient 0,22 de son poids d'eau, et en y ajoutant une certaine quantité d'eau, on obtient une pâte propre à fabriquer du mortier. Ce mode est rarement employé pour les chaux hydrauliques, qui perdent leurs qualités à l'air; mais il convient pour les chaux grasses, dont l'exposition à l'air transforme quelques particules en carbonate de chaux, ce qui facilite le durcissement.

Des pouzzolanes. — On donne généralement le nom de *pouzzolanes* à des substances qui, mélangées dans des proportions convenables

avec de la chaux grasse, fournissent des mortiers capables de durcir plus ou moins rapidement sous l'eau. Certains produits naturels jouissent de cette propriété; ce sont des matières volcaniques, pulvérulentes, essentiellement composées de silice et d'alumine, combinées avec quelques autres substances, telles que la chaux, la potasse, la soude, l'oxyde de fer et autres; quelques pierres volcaniques sont susceptibles de devenir, par la pulvérisation, d'excellentes pouzzolanes; d'autres, telles que les basaltes, ont besoin d'être soumises à une chaleur très-intense pour acquérir cette propriété. Toutes n'ont pas la même énergie; c'est par des essais qu'on détermine la valeur hydraulique de telle ou telle substance, ainsi que la proportion dans laquelle elle doit être mélangée à la chaux pour produire de bon mortier.

Des mortiers. — Le mortier est un mélange de chaux éteinte réduite en pâte molle avec du sable ou de la pouzzolane, quelquefois avec l'une et l'autre de ces deux matières; la propriété essentielle des mortiers est de durcir plus ou moins rapidement en adhérant fortement aux matériaux de construction, de manière à les relier et à en former des masses solides.

Le mortier formé du mélange d'une certaine quantité de sable avec de la chaux non hydraulique grasse ou maigre, durcit rapidement à l'air, par dessiccation et absorption d'acide carbonique; mais il n'y prend jamais autant de cohésion que la chaux seule placée dans les mêmes circonstances. Employé sous l'eau, ce mortier reste mou et se dépouille de toute la chaux qu'il contient, si l'eau est suffisamment renouvelée; s'il est enfin dans le sol, à l'abri du contact de l'air, il conserve la même consistance pendant longtemps, et s'il finit par y durcir, ce n'est qu'avec une extrême lenteur.

En substituant de la pouzzolane au sable, le mortier devient hydraulique; il fait prise plus ou moins rapidement, suivant la qualité de la nouvelle substance, mais toujours en fort peu de temps, et acquiert, soit enfoui, soit sous l'eau, une dureté supérieure à celle de beaucoup de pierres de construction. A l'air libre, ce mortier ne se comporte pas aussi bien : il devient promptement pulvérulent, il est facilement attaqué par les gelées; si l'on met une certaine quantité de sable avec la pouzzolane, il en résulte un mortier dont la prise est plus lente, mais qui est beaucoup moins gélif et plus économique.

Les chaux hydrauliques mélangées avec du sable donnent des mortiers hydrauliques qui durcissent sous l'eau et en dehors du contact de l'air, de la même manière que la chaux elle-même, et y acquièrent le même degré de dureté. S'ils sont exposés à l'air, ces mortiers deviennent encore plus durs, et d'autant plus que la chaux est plus hydraulique; il n'en est pas de meilleur pour les constructions élevées au-dessus du sol.

En résumé, les meilleurs mortiers pour les ouvrages placés sous l'eau sont ceux de chaux non hydraulique avec pouzzolane, ou de chaux peu hydraulique avec sable et pouzzolane; et les mortiers les plus convenables pour les constructions exposées à l'action de l'air sont ceux de chaux hydraulique avec sable; il y a cela de remarquable, que les chaux changent de rôle par suite de leur transformation en mortier.

Des bétons. — On appelle *béton* un mélange de mortier hydraulique avec des cailloux ou de menus éclats de pierre; ce mélange est surtout précieux dans l'établissement des fondations lorsqu'elles sont sous l'eau. Les qualités du béton dépendent beaucoup des proportions des matières mélangées, proportions qui doivent varier avec la nature de ces matières et la destination du mélange.

Généralement, le béton se compose de 3 à 4 parties de pierres réduites à la grosseur de $0^m,05$ à $0^m,06$ avec 2 parties de mortier, et cette opération amène une réduction de volume de 20 à 25 pour 100, par l'interposition du mortier entre les vides de la pierre.

Pour obtenir un béton bien plein, imperméable à l'eau, il faudrait évidemment y introduire un cube de mortier au moins égal à celui des vides; le moyen de connaître ce dernier consisterait à remplir de cailloux un vase de capacité connue, et à y verser ensuite de l'eau jusqu'à ce que le liquide affleurât les bords; le volume d'eau versé, pourvu que les pierres ne fussent pas susceptibles d'être intimement pénétrées par l'eau, donnerait précisément le cube cherché. Mais lorsque le béton n'est pas destiné à résister à la pression de l'eau, quand il n'a pas besoin d'être rigoureusement imperméable, et qu'il suffit qu'il soit incompressible, le volume du mortier peut quelquefois être inférieur à celui des vides de la pierre, et c'est par rapport à cette quantité relative de mortier qui entre dans le mélange, que les ouvriers ont fait la distinction de *béton gras* et de *béton maigre*.

Fabrication du béton. — La fabrication du béton comprend le *dosage* des matières et leur *mélange*. Le dosage se fait avec des brouettes fermées de mesure connue; celles qui sont destinées à l'approche des cailloux, ont leur fond percé de trous ou formé de tringles en fer, afin de faciliter le passage de l'eau que l'on est obligé de jeter sur les pierres pour les nettoyer. Quant au mélange, il s'opère soit à bras sur une aire, à l'aide de griffes en fer à trois dents recourbées et à long manche, soit au moyen de machines spéciales, lorsque l'on a de grandes quantités à fabriquer.

DES SULFURES.

Les sulfures métalliques résultent de la combinaison du soufre avec les métaux.

La chaleur décompose les sulfures des métaux de la 6e section, excepté celui d'argent. Les sulfures simples sont composés de telle manière, qu'en décomposant l'eau ils forment du gaz sulfhydrique et un oxyde salifiable. On voit que 1 équivalent de soufre dans un sulfure, remplace 1 équivalent d'oxygène dans un oxyde. Par rapport à l'action de l'eau sur les sulfures, on peut les partager en trois classes : les sulfures solubles dans l'eau, qui sont ceux de la 1re section, et ceux de magnésie, de glucinium, d'yttrium; les sulfures insolubles hydratés, qui sont ceux de zinc, de manganèse, de fer. L'eau n'a pas d'action sur tous les autres sulfures métalliques. Les sulfures de la 2e section soumis à l'action simultanée de l'eau et de la chaleur se transforment en hydrogène sulfuré et en oxydes. L'oxygène sec agit sur les sulfures en les transformant : 1° en hyposulfites, sulfates : tel est le cas des métaux alcalins: 2° en oxyde : tel est

le sulfure de plomb; 3° en oxysulfure : tel est le sulfure d'antimoine; 4° en métal et en acide sulfureux, comme le sulfure de mercure. Le chlore transforme les sulfures anhydres en chlorures métalliques et en chlorures de soufre. Le brome et l'iode produisent des réactions semblables.

Plusieurs sulfures, tels que ceux de plomb, d'antimoine, d'argent, sont décomposés par les métaux, tels que le fer. Ce procédé est usité dans les arts pour l'extraction de quelques métaux.

Sulfure de potassium. — Berzelius admet cinq sulfures de potassium en proportions définies, et deux autres sulfures résultant de la combinaison des sulfures les uns avec les autres. Dans les sulfures définis, les quantités de soufre sont entre elles comme 1, 2, 3, 4, 5, et les formules sont SK, S^2K, S^3K, S^4K, S^5K.

Protosulfure. — Le moyen de l'obtenir consiste à chauffer à la chaleur blanche dans des creusets des morceaux de sulfate potassique; il en résulte un protosulfure mamelonné, cristallin, translucide. Ce sulfure fond avec la chaleur rouge, se dissout dans l'alcool et dans l'eau sans la colorer, mais en développant beaucoup de chaleur; quand il est divisé avec du charbon, il peut s'enflammer au contact de l'air par l'action de l'humidité atmosphérique; c'est même la cause de l'inflammation de plusieurs pyrophores. Une dissolution de protosulfure de potassium, exposée à l'air, absorbe peu à peu l'oxygène et passe successivement à l'état d'hyposulfite, sulfite et sulfate, sans dépôt de soufre; l'air lui rend l'oxygène que le carbone lui a enlevé. Le chlore, l'iode et le brome précipitent le soufre et forment des chlorures, iodures, bromures. Les acides le décomposent avec dégagement de gaz sulfhydrique sans dépôt de soufre.

Sulfhydrate de protosulfure de potassium. — Le protosulfure de potassium absorbe le gaz sulfhydrique et forme un composé susceptible de cristalliser. Le sulfure de potassium y est combiné avec le gaz sulfhydrique en une proportion telle, que ces deux corps contiennent une quantité égale de soufre.

Bisulfure de potassium. — On le prépare en dissolvant dans l'alcool du sulfhydrate de protosulfure de potassium, exposant la liqueur au contact de l'air jusqu'à ce qu'elle se trouble à sa surface et en évaporant dans le vide.

Trisulfure de potassium. — On l'obtient en faisant passer un excès de vapeur de soufre sur du carbonate de potasse chauffé au rouge.

Quadrisulfure. — On substitue, dans l'opération précédente, du sulfate de potasse au carbonate, et l'on obtient du quadrisulfure.

Quintisulfure de potassium. — Pour l'obtenir pur, on chauffe un excès de soufre avec du protosulfure de potassium : ce composé est connu sous le nom de *foie de soufre*.

Sulfures de sodium. — Ils ressemblent aux sulfures correspondants de potassium, et ils sont particulièrement employés en médecine contre les maladies de la peau

Protosulfure de barium. — On l'obtient en chauffant le sulfate de baryte avec le charbon. Ce sulfure est blanc, grenu, cristallin, soluble dans l'eau chaude et donnant des cristaux brillants, incolores

par le refroidissement. Il existe des polysulfures de barium que nous n'avons point examinés.

Sulfures de calcium. — On procède à leur préparation comme à celle des sulfures de barium. Le protosulfure est blanc, opaque, peu soluble dans l'eau.

Sulfures de fer. — Il en existe cinq en proportions définies; plusieurs de ces combinaisons existent dans la nature; on les connaît sous le nom de *pyrite*, *pyrite martiale*. L'un d'eux est un beau minerai jaune, qu'on a nommé *or des ânes*, parce qu'il n'est d'aucune utilité et qu'on le prend quelquefois pour une mine d'or.

Sulfure de plomb. — C'est la mine de plomb la plus abondante; il cristallise en cubes d'une couleur gris-bleuâtre; on l'emploie, sous le nom d'*alquifou*, dans la fabrication de certains verres ou poteries.

Sulfures de cuivre. — Le soufre se combine en plusieurs proportions avec le cuivre pour former des sulfures d'une couleur noire ou brune. Le protosulfure peut s'obtenir en faisant fondre du cuivre avec du soufre.

Sulfure de zinc. — La combinaison du soufre et du zinc est la mine de zinc la plus répandue.

Sulfures de mercure. — Il existe deux sulfures de mercure, correspondant aux deux oxydes. Le protosulfure est noir; il s'obtient en précipitant un sel de protoxyde par le gaz sulfhydrique. La chaleur le décompose en mercure et en bisulfure; il est décomposé de même par la potasse qui dissout le deutosulfure; sa formule est $= Hg^2S$.

Deuto ou bisulfure. — Ce composé existe dans la nature; c'est la mine de mercure la plus abondante; mais on le fabrique dans les arts pour obtenir le vermillon, en faisant agir 85 de mercure sur 15 de soufre. Le sulfure de mercure est tantôt noir, tantôt rouge; il se volatilise, sans se fondre, à une température peu élevée; il cristallise en prismes hexaèdres; à l'état de vermillon, c'est une couleur rouge très-éclatante. Sa formule $= HgS$.

Sulfures d'antimoine. — Il en existe trois, mais un seul doit nous occuper. Le *protosulfure*, *sulfure antimonique* ou mieux *sulfite hypantimonieux* se trouve dans la nature. Il est d'un gris bleuâtre, métallique, cassant; il est un peu moins fusible que l'antimoine métallique; il cristallise confusément par le refroidissement; il est volatil, mais la chaleur paraît le décomposer partiellement; il se grille avec facilité, se transforme en oxyde sans formation de sulfate; chauffé à la chaleur blanche avec le carbone, il se produit du sulfure de carbone. Plusieurs métaux, et l'argent lui-même, le décomposent en séparant l'antimoine métallique. Les acides l'attaquent plus facilement que l'antimoine; avec l'acide chlorhydrique, il se dégage du gaz sulfhydrique pur. Il contient ordinairement de l'arsenic. C'est la mine d'antimoine la plus répandue. Sa formule $= SbS^3$.

CHIMIE ORGANIQUE.

Composition générale. — Les éléments qui entrent dans la composition des matières organiques sont : l'oxygène, l'hydrogène et le carbone; ces corps, mélangés en diverses proportions, constituent le plus grand nombre des produits qui entrent dans la composition des

végétaux. L'azote contribue à former avec eux une nombreuse série de principes qui entrent aussi dans la composition des végétaux et des animaux. Le soufre, le chlore, l'iode, le silicium, le magnésium, le calcium, le sodium, le potassium, le manganèse, le verre, le cuivre et l'or se trouvent aussi accidentellement dans les matières organiques, mais ils n'y sont pas essentiels. La nature, dans son organisation, n'opère que sur un petit nombre d'éléments combinés dans les rapports les plus simples. Tout le système des équivalents de la nature organique roule sur ces quatre nombres 1, 6, 7, 8. Si l'on prend l'hydrogène pour unité, 1 est l'équivalent de l'hydrogène, 6 celui du carbone, 7 ou 2 fois 7 celui de l'azote, 8 celui de l'oxygène.

Analyse organique immédiate et élémentaire. — L'analyse chimique est immédiate lorsqu'elle a pour objet de séparer les composés qui constituent immédiatement les êtres organisés ; on nomme ces composés *principes immédiats*. L'analyse est élémentaire lorsqu'elle a pour objet de déterminer la nature et la proportion des éléments qui constituent ces mêmes composés.

Analyse élémentaire. — C'est Lavoisier qui fit les premiers pas dans cette carrière féconde. Ses recherches sur la combustion de l'huile et de l'esprit-de-vin sont précieuses. Les premières expériences exactes sont dues à MM. Gay-Lussac et Thenard. Ils brûlaient la matière mélangée avec une quantité suffisante de chlorate de potasse; M. Gay-Lussac substitua plus tard l'oxyde cuivrique au chlorate de potasse; la décomposition devint, par ce moyen, beaucoup plus lente et plus complète. En négligeant les corps peu nombreux qui renferment du soufre ou du phosphore, les matières à analyser renferment du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène et quelquefois de l'azote. Le procédé constant que l'on suit consiste à transformer le carbone et l'hydrogène en acide carbonique et eau; quand il y a de l'azote, sa détermination exige un nouvelle analyse, mais ne gêne pas pour la première. Pour doser l'hydrogène et le carbone, on fait passer l'eau en vapeur et l'acide carbonique formés, d'abord sur du chlorure de calcium, et ensuite dans une dissolution de potasse caustique. La différence des poids de chlorure du calcium et du tube à potasse donne les poids d'eau et d'acide carbonique formés. Si la matière ne contenait pas d'azote par différence, on estimera le poids d'oxygène; si elle en contenait, on dosera l'azote dans une seconde analyse, et connaissant trois éléments, on en conclura toujours le poids du quatrième par différence.

Détermination de l'azote. — On peut déterminer la proportion d'azote en l'engageant dans une combinaison ammoniacale. Pour constater la présence de l'azote dans une substance organique, on la fait chauffer avec un hydrate alcalin au fond d'un petit tube de verre. L'eau d'hydratation de l'alcali est décomposée; son oxygène brûle la matière organique; son hydrogène se combine à l'état naissant avec l'azote de la matière organique, et l'on sent une forte odeur d'ammoniaque. On a utilisé ce procédé pour l'analyse des matières organiques azotées. On commence par humecter de la chaux vive ou éteinte avec une dissolution de potasse caustique. On calcine le tout, afin d'avoir un mélange intime de ces deux substances, et pour chasser l'excès d'hu-

midité. On met dans un tube le mélange de matières azotées et de matières alcalines ; tout l'azote passe à l'état d'ammoniaque qu'on recueille dans un tube où l'on met de l'acide chlorhydrique. A la fin de l'opération, pour absorber tout le gaz ammoniac, on casse la pointe du tube à combustion et l'on aspire l'air atmosphérique par l'autre extrémité du tube. L'ammoniaque, poussée par l'air, vient se condenser dans la dissolution d'acide chlorhydrique. Pour déterminer la proportion de chlorhydrate d'ammoniaque formée, on verse la dissolution dans une capsule, et on lave avec soin le tube. Ajoutant l'eau de ces lavages à celle qui est dans la capsule, on est sûr d'avoir tout le chlorhydrate d'ammoniaque; on évapore un peu cette dissolution, et l'on y ajoute du chlorure de platine en excès. Il faut qu'après la précipitation du chlorure double de platine et d'ammoniaque, la liqueur reste jaune. Le chlorure double est insoluble, surtout dans l'eau qui contient de l'alcool ; il est tout à fait insoluble dans un mélange d'éther et d'alcool. Comme on connaît la composition de ce chlorure double, on sait combien il y a d'ammoniaque formée, et, par suite, combien d'azote était dans la substance organique.

Détermination de la capacité de saturation. — Parmi les corps organiques, les uns jouissent de propriétés *acides*, d'autres sont *basiques*, d'autres enfin sont *neutres*. Les deux premières espèces présentent des réactions très-nettes; les acides organiques se combinent avec les bases minérales pour former des sels parfaitement définis; les bases forment aussi des sels avec les acides minéraux ; de sorte que l'on a toujours pour ces corps des conditions auxquelles doit satisfaire leur formule en équivalents chimiques. Les corps neutres, au contraire, n'entrent pas dans les combinaisons, ou ne forment que des combinaisons mal définies; aussi leur formule atomique est-elle souvent incertaine.

MATIÈRES CONSTITUANTES DES VÉGÉTAUX.

Des acides organiques. — De tous les principes qui entrent dans la composition des matières organiques, les acides ont les propriétés les plus tranchées; ceux que nous avons à traiter ici ne peuvent point être formés directement par la combinaison des éléments qui les composent; ils ne sont tous produits que dans les organes des corps vivants et par la transformation des substances organiques. L'oxygène, l'hydrogène, le carbone, en proportions différentes, sont les principes constants de ces corps. On peut les considérer comme des oxydes à radicaux composés d'hydrogène et de carbone, ou bien, comme cela paraît démontré pour l'un d'eux, *l'acide benzoïque*, comme des oxydes de radicaux formés de trois éléments : oxygène, hydrogène et carbone.

Les acides organiques sont généralement solides et cristallisés : il en est de liquides, comme l'acide formique. L'action de la chaleur est très-diverse sur ces corps. Les uns se fondent sans subir aucune altération, comme les acides gras; les autres se volatilisent et se condensent sans décomposition ; d'autres sont en partie décomposés et en partie volatilisés sans décomposition; et enfin, et c'est le cas le plus remarquable, d'autres se transforment sous l'influence de la chaleur

en de nouveaux acides pyrogénés. Ces acides, selon M. Pelouze, dérivent des acides qui les ont fournis d'une manière assez simple. Ainsi, *un acide pyrogéné quelconque, plus une certaine quantité d'eau et d'acide carbonique, ou seulement l'un de ces corps, présente toujours la constitution de l'acide qui lui a donné naissance.*

Les acides organiques sont généralement inaltérables à l'air à la température ordinaire. Ils sont tous plus ou moins solubles dans l'eau, si l'on en excepte les acides gras, qui forment à eux seuls un groupe bien caractérisé. On divise les acides en *acides forts* et *acides faibles*. Les acides forts ont généralement une composition atomique plus simple; quelques-uns d'entre eux rivalisent avec les acides inorganiques les plus puissants.

Tous ont une saveur plus ou moins acide, rougissent le papier de tournesol, et en se combinant avec les bases forment des sels en proportions définies.

Les acides organiques, qui existent tout formés dans les végétaux, sont ou libres ou combinés; ils existent ordinairement à l'état de liberté dans la chair des fruits, dans les feuilles des arbres; on ne les rencontre pas communément dans les graines ou dans les racines.

Acide acétique. — C'est l'acide qui est contenu dans le vinaigre. On prépare l'acide acétique: 1° en décomposant un acétate par l'acide sulfurique; 2° en décomposant un acétate par le feu, et c'est particulièrement l'acétate de cuivre qu'on emploie à cet usage. Il se produit, outre l'acide, du gaz hydrogène carboné, de l'oxyde de carbone et de l'esprit pyro-acétique ou *acétone*. Il faut le rectifier pour le priver d'acétate de cuivre qui est entraîné et qui colore le produit en bleu. Son odeur particulière, sa volatilité, ne permettent de le confondre qu'avec l'acide formique; mais les caractères de plusieurs sels sont très-différents.

L'acide acétique offre dans l'économie domestique et dans les arts d'importants et nombreux usages.

Acide citrique. — Cet acide se trouve dans les citrons, les tamarins, les groseilles. Après l'avoir clarifié avec des blancs d'œufs, on y ajoute de la craie; il se forme du citrate de chaux qu'on décompose par l'acide sulfurique. L'acide citrique cristallise en prismes obliques à quatre pans terminés par des sommets dièdres. Quand on mélange 1 partie d'acide citrique cristallisé avec 4 parties d'acide sulfurique et qu'on chauffe doucement, il se dégage une grande quantité d'oxyde de carbone et d'acide carbonique. Si l'on ajoute de l'eau et qu'on distille, on obtient de l'acide acétique. On reconnaît l'acide citrique, à ce qu'il forme des sels insolubles avec la chaux, la baryte, la strontiane, l'oxyde de plomb. Le citrate de plomb est soluble dans l'ammoniaque. On emploie l'acide citrique pour faire d'excellentes limonades.

Acide tartrique. — Cet acide existe à l'état de tartrate acide de potasse dans le tartre, dépôt qui se forme dans les tonneaux contenant du vin; il est solide; sa forme cristalline est un prisme vertical à quatre pans terminé par deux faces inclinées et par des sommets dièdres tronqués; il est très-soluble dans l'eau et dans l'alcool. Cet acide est très-employé pour faire des boissons rafraîchissantes.

Tannin, acide tannique. — Le tannin pur est incolore; sa saveur est le type de l'astringence. Très-soluble dans l'eau, sa dissolution rougit le tournesol, décompose les carbonates alcalins, précipite la plupart des dissolutions métalliques. Une solution aqueuse de tannin, abandonnée à l'air, absorbe assez rapidement l'oxygène, et laisse précipiter une matière cristalline, légèrement colorée en gris, qui est de l'acide gallique. Les sels de fer, au minimum, ne la troublent pas, mais elle précipite abondamment en bleu foncé les sels ferriques.

Le tannin, versé dans une dissolution de gélatine en excès, y produit un précipité blanc, opaque, soluble, surtout à chaud, dans la liqueur qui surnage; mais quand le tannin est en excès, le composé est insoluble; la peau préparée par la chaux s'en empare complétement et le sépare entièrement de l'acide gallique.

L'acide tannique est composé de 18 équivalents de carbone, 7 d'hydrogène et 9 d'oxygène, plus 3 équivalents d'eau.

Encres. — Les acides tannique et gallique, en réagissant sur les sels de fer, produisent des tannates de peroxyde de fer d'une belle couleur noire, qui ont de nombreuses applications dans l'art de la teinture, et qui forment la base de *l'encre ordinaire*. Voici la recette que l'on peut suivre pour préparer ce produit important : noix de galle concassée, 1 kilogramme; sulfate de fer ou couperose verte, 500 grammes; gomme arabique, 500 grammes; eau, 16 litres. On fait une forte décoction de la galle dans 13 ou 14 litres d'eau; on passe à travers une toile, on ajoute à la liqueur claire la gomme, puis la couperose qu'on a fait dissoudre séparément dans le reste de l'eau prescrite; on agite le mélange, et on l'abandonne au contact de l'air jusqu'à ce qu'il ait acquis une belle teinte d'un noir bleuâtre. On laisse reposer, on tire à clair, et l'on renferme l'encre dans des bouteilles que l'on bouche avec soin.

Ligneux (fibre végétale, cellulose). — C'est de tous les principes immédiats des végétaux le plus répandu et le plus abondant. On le trouve dans toutes les parties des plantes; il constitue la fibre proprement dite; il entre pour 95 pour 100 dans la composition du bois. On considère comme du ligneux, la substance qui reste indissoute quand on a épuisé une plante ou une partie végétale par l'éther, l'alcool, l'eau, les acides affaiblis et les alcalis caustiques, en dissolution assez étendue pour dissoudre les matières étrangères sans dénaturer le ligneux.

Amidon. — On appelle *amidon* ou fécule amylacée, une matière blanche, brillante, qui se précipite du suc d'un grand nombre de végétaux; chaque grain d'amidon est formé d'un tégument renfermant un seul principe immédiat, l'*amidone*, dont la texture est organique; celle-ci est moins compacte à mesure que l'on se rapproche du centre, et le tégument lui-même peut être considéré comme une couche extérieure plus concrète que les autres.

L'amidon se rencontre dans une foule de végétaux; mais c'est particulièrement dans les tiges souterraines ou rhizomes qu'on le trouve en grande proportion, où il forme quelquefois un amas considérable; on le rencontre dans la tige des palmiers; il constitue la plus grande partie de plusieurs semences; dans toutes les plantes, il a des pro-

priétés communes, et il ne forme qu'une seule espèce; mais il présente aussi dans chaque végétal des différences qui permettent de le distinguer. L'amidon est sans odeur ni saveur : c'est une poudre blanche, brillante, insoluble dans l'alcool, l'éther, les huiles fixes et volatiles, insoluble dans l'eau froide. Traité par l'eau bouillante, il se convertit en une gelée connue sous le nom d'*empois*. Le caractère le plus remarquable de l'amidon, quand il n'est point altéré, consiste en belle coloration bleue qu'il donne avec l'iode.

Sucres. — On appelle *sucres*, des corps d'une saveur douce et sucrée, facilement solubles dans l'eau, et qui se transforment sous l'influence d'un ferment alcoolique en acide carbonique et en alcool. Il existe plusieurs espèces de sucres : 1° sucre de canne; 2° sucre liquide de fruits; 3° sucre d'inuline; 4° sucre mamelonné ou glucose. Les sucres sont assez nourrissants, mais ils ne peuvent longtemps suppléer à une nourriture azotée; ils passent pour échauffants, mais c'est un préjugé.

De la gomme. — La gomme est solide, incristallisable, incolore, insipide, sans odeur, inaltérable à l'air, soluble dans l'eau, capable de former avec celle-ci une sorte de gelée qu'on appelle *mucilage;* insoluble dans l'alcool, facilement décomposable par l'acide nitrique, qui la transforme en partie en acide mucique.

La gomme est un des corps immédiats des végétaux les plus répandus; on la rencontre dans toutes les parties des plantes herbacées, dans tous les fruits, dans un assez grand nombre de racines et de tiges ligneuses, enfin dans toutes les feuilles.

La gomme est employée en médecine; les arts en tirent aussi un grand parti.

Des résines. — Les résines, dont il existe un grand nombre d'espèces, sont des substances solides, cassantes, inodores, insipides ou âcres, un peu plus pesantes que l'eau, demi-transparentes au moins et d'une couleur tirant le plus ordinairement sur le jaune : aucune n'est conducteur du fluide électrique; toutes s'électrisent d'une manière négative par le frottement. Soumises à l'action du feu, les résines se fondent d'abord, et se décomposent ensuite en donnant lieu à divers phénomènes selon qu'on opère en vases clos ou en vases ouverts : en vases clos, elles se transforment en une grande quantité de gaz hydrogène carburé, d'huile empyreumatique et une petite quantité de charbon; en vases ouverts, elles brûlent avec une flamme jaune et répandent une grande quantité de fumée noire.

L'air n'a aucune action sur elles à la température ordinaire. Elles sont toutes insolubles dans l'eau. La plupart, au contraire, se dissolvent dans l'alcool, dans l'éther sulfurique, dans les huiles grasses, dans les huiles essentielles, et dans la potasse et la soude en liqueur, surtout à l'aide de la chaleur. Les résines se trouvent presque toutes contenues dans des arbrisseaux ou des arbres de différentes hauteurs. La plupart sont unies à des huiles essentielles qui les ramollissent; elles sont composées d'une grande quantité de carbone, d'hydrogène et d'une petite quantité d'oxygène.

Les résines ont divers usages; on les emploie principalement dans la composition des vernis.

FERMENTATION ALCOOLIQUE.

On donne le nom de *fermentation* à la décomposition spontanée des matières organiques sous l'influence des corps organisés spéciaux nommés *ferments*. On distingue trois espèces de fermentations : 1° les liquides qui contiennent du sucre fournissent d'abord, sous l'influence des ferments, de l'alcool, de l'acide carbonique, et cette transformation a reçu le nom de *fermentation vineuse* ou *alcoolique*; 2° ces liquides alcooliques deviennent ensuite acides, en donnant ainsi naissance à de l'acide acétique, époque qui constitue la *fermentation acide;* 3° la plupart des substances organiques se transforment lentement en *humus* en subissant des altérations aussi variées que leur nature, en dégageant souvent des gaz infects : on nomme cette décomposition *fermentation putride*. Si l'on considère toutes les transformations spontanées que peuvent éprouver les matières organiques, on doit admettre un grand nombre d'autres fermentations particulières. Nous allons parler de la plus importante de toutes, *la fermentation alcoolique.*

Fermentation vineuse ou alcoolique. — Un liquide peut subir la fermentation alcoolique moyennant quatre conditions essentielles : 1° il faut qu'il contienne du sucre liquide ou du glucose, ou des matières qui, par leurs transformations, peuvent en former ; 2° que la solution soit suffisamment étendue d'eau ; 3° que la température soit entre 10 et 30 degrés ; 4° que l'action soit excitée par la présence de corps particuliers, connus sous le nom de ferments.

La fermentation s'opère de la manière suivante : Quand on exprime le suc d'une partie végétale sucrée, par exemple du raisin, des bettraves, etc., qu'on abandonne la liqueur limpide à elle-même dans un vase légèrement couvert, et à une température de 20 à 24 degrés, elle devient opaline dans l'espace de quelques heures, et quelquefois plus tôt, et il s'y manifeste un faible dégagement de gaz qui augmente peu à peu, tandis que la liqueur se trouble et prend un aspect d'eau argileuse ; à la fin, la masse entre en effervescence permanente et assez forte pour être entendue ; il s'y produit un dégagement de chaleur, de sorte que la température du liquide s'élève au-dessus de celle de l'air ambiant. Les bulles de gaz partent de la matière qui se précipite ; elles se fixent sur cette matière, et l'entraînent avec elles à la surface de la liqueur, qui se trouve ainsi couverte d'un précipité surnageant. Les portions du précipité qui sont débarrassées des bulles gazeuses qui les ont entraînées tombent sans cesse au fond de la liqueur, développent de nouvelles bulles de gaz, et, à peine arrivées au fond, elles se trouvent entourées de bulles de gaz et soulevées de nouveau à la surface. Ce mouvement continue pendant un certain espace de temps qui varie suivant la température, la quantité et l'espèce de sucre contenues dans la liqueur, l'efficacité du ferment, etc ; il peut durer depuis quarante-huit heures jusqu'à plusieurs semaines. Dès que tout le dégagement du gaz a cessé, le précipité rassemblé à la surface du liquide, et qui consiste en ferment, tombe au fond du vase, s'éclaircit, parce que le ferment ne se trouve plus soulevé par des bulles de gaz. Dans cet état, la liqueur ne contient plus de sucre,

et sa saveur n'est plus sucrée; elle consiste en un mélange d'eau et de liquide volatil, qui est un des produits de la fermentation, que l'on connaît sous le nom d'*alcool* ou d'*esprit-de-vin*.

Eau-de-vie et alcool. — On obtient l'eau-de-vie et l'alcool par la distillation du vin et de plusieurs autres liqueurs fermentées, sans avoir égard à la présence de corps qui peuvent rendre la masse fermentée impropre à servir de boisson; de ce nombre sont les mélanges que l'on fait fermenter pour obtenir les eaux-de-vie de grains et de pommes de terre. On fabrique aussi l'eau-de-vie avec le marc du raisin.

Les vins du Midi, riches en alcool et qui ne sont pas recommandables par le bouquet, sont souvent distillés avec avantage pour obtenir de l'eau-de-vie; c'est la meilleure qualité. On l'a connaît sous le nom d'eau-de-vie de Cognac ou de Montpellier. On distille aussi le marc du raisin; mais, quand on opère à feu nu, on obtient un produit chargé du goût d'empyreume. Il vaut mieux distiller les vinasses qu'on prépare en épuisant le marc avec l'eau.

L'eau-de-vie qu'on obtient en faisant fermenter la mélasse brune, après l'avoir étendue d'eau, reçoit le nom de *tafia*. Le rhum est une espèce d'eau-de-vie plus forte, que l'on obtient par les fermentations des sirops provenant du raffinage du sucre; on appelle *kirch* l'eau-de-vie qui s'obtient en distillant le produit de la distillation des cerises noires. Chacune de ces eaux-de-vie a une saveur différente, qu'elles doivent à la présence des huiles volatiles contenues dans les matériaux qui servent à leur préparation.

Propriétés de l'alcool anhydre. — C'est un liquide incolore, très-fluide, d'une odeur particulière, pénétrante, d'une saveur brûlante et même caustique, ce qui tient à ce qu'il enlève l'eau aux tissus vivants, et cette action peut s'étendre au point d'éteindre la vie dans ces parties. Pris en petite quantité, il excite vivement l'économie; à forte dose, il enivre. La densité de l'alcool à 15 degrés de température est de 0,79 comparée à celle de l'eau prise à la même température.

Des éthers. — On a donné le nom d'*éthers* à des produits résultant de l'action des acides sur l'alcool.

Éther sulfurique. — C'est un liquide incolore, très-fluide, d'une odeur particulière, forte et pénétrante; d'une saveur d'abord brûlante, puis fraîche. Il est neutre, ne conduit point l'électricité, et réfracte fortement la lumière. Sa densité à 20 degrés est de 0,713; il bout à 35°,366, à une pression de 0,67; à — 31 degrés l'éther commence à cristalliser; à — 44 degrés il se présente sous forme d'une masse blanche, solide, cristalline. L'éther brûle facilement avec une flamme très-étendue. L'eau dissout $\frac{1}{9}$ de son poids d'éther; il se mêle en toutes proportions avec l'alcool. L'éther dissout un grand nombre de matières organiques.

L'éther est un des médicaments les plus fréquemment usités comme antispasmodiques.

CORPS GRAS.

On appelle corps gras des substances liquides ou solides qui peuvent se liquéfier à une température peu élevée, qui tachent le papier,

qui sont insolubles dans l'eau, solubles dans l'alcool et dans l'éther, surtout à chaud, qui brûlent facilement, et qui, en général, forment des combinaisons solubles avec les alcalis. Les corps gras sont composés de plusieurs principes immédiats, classés par M. Chevreul de la manière suivante :

1re Division. — Corps gras non acides. — 1er *genre*. Non attaquables par les alcalis et non susceptibles de s'y unir. 1er groupe, existant tout formés dans la nature, telles sont : la cholestérine, l'ambréine, la myricine et la castorine. 2e groupe, produit pendant la saponification : éthal, céraine, glycérine. 3e groupe, produit par l'action des alcalis sur les corps gras à une haute température : oléone, stéarone, margarone.

2e *genre*. Susceptibles d'être convertis par les alcalis en acides gras fixes et une substance non acide : cétine, cérine, margarine, stéarine, oléine, élaïdine, palmine.

3e *genre*. Susceptibles d'être convertis par les alcalis en acides gras fixes, en acides gras volatils et en glycérine : phocénine, hircine, butyrine.

2e Division. — Corps gras acides. — 1er *genre*. Qui ne se volatilisent pas quand on les met dans l'eau bouillante, fixes relativement à ceux du 2e genre : acides stéarique, margarique, oléique, ricinique, stéaroricinique, oléoricinique, élaïdique, palmique.

2e *genre*. Qui peuvent distiller avec l'eau, volatils : acides cévadique, crotonique, phocénique, butyrique, caproïque, caprique, hircique.

Nous ne parlerons ici que de l'oléine, de la stéarine et de la margarine, qui par leur mélange forment presque tous les corps gras d'origine animale et végétale.

Stéarine. — Elle est solide, blanche, sans odeur ni saveur; elle cristallise en lames nacrées et brillantes, assez friables pour être pulvérisées; elle fond à 62 degrés; l'alcool bouillant en dissout 0,21 ; l'éther bouillant en dissout beaucoup plus ; les alcalis la convertissent en acide stéarique et en glycérine.

Margarine. — Elle est blanche, solide, incolore et inodore; elle est fusible à 47 degrés, insoluble dans l'eau ; l'éther froid en dissout beaucoup plus que de stéarine; elle donne, par l'action des alcalis, de la glycérine et de l'acide margarique mêlé d'acide stéarique.

Oléine. — Elle est liquide, incolore, inodore; l'alcool bouillant en dissout $\frac{123}{100}$; l'éther la dissout presque en toutes proportions ; par la saponification, elle donne de l'acide oléique mêlé d'acide margarique et de la glycérine.

Savons. — Saponification. — La saponification est l'opération qui a pour but de transformer les corps gras en savons. Pour en donner une idée nette, choisissons un corps gras pur, la stéarine par exemple. Elle est composée de 146 atomes de carbone, 143 atomes d'hydrogène et 17 atomes d'oxygène ; la stéarine correspond à 2 atomes d'acide stéarique, 1 atome de glycérine et 2 atomes d'eau. Comme hydrate d'un acide, cette combinaison est parfaitement semblable à l'acide sulfoglycérique, 2 atomes d'acide sulfurique y sont remplacés par 2 atomes d'acide stéa-

rique, et elle contient d'ailleurs exactement la même quantité d'eau de combinaison qu'un atome d'acide stéarique libre.

La stéarine est décomposée par les alcalis en acide stéarique et en hydrate de glycérine. Si 3 atomes d'eau se fixent dans cette réaction sur les nouveaux produits, savoir 2 atomes sur 1 atome d'acide stéarique et 1 atome sur l'atome de glycérine, le calcul indique que 100 parties de stéarine devraient donner une somme totale de 102,3, dont 7,9 en hydrate de glycérine. Les expériences de M. Chevreul présentent une concordance frappante avec ces calculs. De 100 parties de stéarine qui devaient contenir encore une quantité sensible d'oléine, si l'on en juge par son point de fusion et celui de l'acide gras obtenu en la saponifiant, M. Chevreul a retiré 102,6 de produits dans lesquels la glycérine entrait pour 8 parties.

Huiles essentielles ou volatiles (essences). — Les essences diffèrent beaucoup les unes des autres par leurs propriétés physiques. Elles exercent une action différente suivant leur nature sur la lumière polarisée. Ainsi les essences de térébenthine, de genièvre, de cubèbe, de copahu, etc., dévient à gauche le plan de polarisation, tandis que l'essence de citron et celles des autres fruits de la famille des hespéridées le dévient à droite. Les essences ont des couleurs propres variées : il en est de jaunes, de rouges, d'incolores, de bleues, de brunes; mais par une rectification bien ménagée, elles deviennent presque toutes incolores. Elles ont des odeurs très-fortes et très-variées : leur saveur est âcre et irritante; leur densité varie de 0,847 à 1,096. En général elles sont plus légères que l'eau, et leur point d'ébullition varie, mais s'élève ordinairement à 160 degrés. Distillées seules ou mélangées avec de l'argile, elles se décomposent en partie; en revanche elles distillent facilement avec de l'eau. A l'air libre, elles brûlent avec une flamme fuligineuse; leur point de congélation varie beaucoup : il en est de solides à la température ordinaire; d'autres ne se solidifient qu'au-dessous de 0. Certaines huiles essentielles, sous l'influence du froid, se séparent en deux huiles différentes, l'une solide appelée *stéaroptène*, l'autre liquide appelée *éléoptène*. Les huiles volatiles soumises à l'action de l'air deviennent plus foncées; elles absorbent peu à peu l'oxygène, elles dégagent en même temps du gaz hydrogène et du gaz acide carbonique, et forment divers composés variés; elles sont peu solubles dans l'eau, cependant le peu qui s'y dissout lui communique leur saveur et leur odeur. Elles se dissolvent dans l'alcool et d'autant mieux que ce liquide contient moins d'eau. Quelques huiles volatiles exemptes de gaz oxygène, telles que les huiles de térébenthine et de citron, sont très-peu solubles dans l'alcool étendu.

Jusqu'à présent on n'a fait que peu d'expériences sur la réaction des bases salifiables et des huiles essentielles. Cependant ces expériences suffisent pour prouver que les huiles essentielles et les bases n'ont pas une grande affinité réciproque; aussi a-t-on proposé de désigner les composés qu'elles peuvent former sous le nom de *savonnules*. Le savonnule qui a été le plus étudié est celui qui résulte de la combinaison de la soude et de l'huile essentielle de térébenthine.

Enfin les huiles essentielles se combinent en toutes proportions avec

les huiles fixes. Elles dissolvent les résines, le camphre, et même le caoutchouc, propriétés dont les arts tirent un grand parti pour la composition des vernis; elles s'unissent aussi à l'éther avec facilité.

Les huiles essentielles ont des propriétés opposées à celles des huiles fixes: en effet elles sont âcres, caustiques, très-odorantes, sans viscosité, très-volatiles, inflammables par l'approche d'un corps en combustion, sensiblement solubles dans l'eau, incapables de former des combinaisons intimes avec les alcalis. Les huiles fixes, au contraire, sont douces, presque inodores, visqueuses, difficilement volatiles, insolubles dans l'eau; elles ne s'enflamment point par l'approche d'un corps en combustion, et ont beaucoup d'affinité pour les bases salifiables.

Les essences ont une assez grande importance commerciale en raison de leurs divers usages dans les arts et la médecine; elles servent à préparer les vernis à l'essence et les vernis gras; à enlever les taches de graisse et de peinture à l'huile sur les vêtements et surtout de dessus les étoffes de laine et de soie.

NOTIONS DE GÉOLOGIE.

Objet de la Géologie. — La Géologie a pour but de faire connaître la forme de la terre, la nature des matériaux qui la composent, leur arrangement, les phénomènes qui se passent dans l'intérieur, ceux qui agissent incessamment à sa surface, et, enfin, ceux qui l'ont successivement modifiée depuis la création.

COMPOSITION DE L'ÉCORCE SOLIDE DE LA TERRE.

L'écorce solide de la terre n'est connue que très-superficiellement, attendu que les excavations les plus profondes sont bien peu étendues comparativement au rayon de la terre; on a pu néanmoins constater que cette couche superficielle est formée d'éléments très-divers.

Roches. — On nomme *roches* les minéraux simples ou les composés de plusieurs minéraux qui existent dans différentes parties du globe, et qui conservent constamment les mêmes caractères de composition et de structure : tels sont les *granites*, les *schistes*, les *calcaires*, etc.

Dépôt. — On nomme *dépôt* un groupe de roches dans lesquelles il y en a une qui est dominante et les autres subordonnées : ainsi, par exemple, la montagne de Montmartre, près Paris, est un dépôt gypseux accompagné de marnes.

Stratification. — On entend par *stratification* le parallélisme qui existe entre toutes les masses minérales dont se compose un dépôt ou un terrain composé de plusieurs dépôts; quand ces dépôts sont régulièrement placés les uns au-dessus des autres, on dit qu'il y a *superposition*.

Fossiles. — On nomme *fossiles* les empreintes de différentes sortes que l'on trouve dans les couches du globe, et qui proviennent de corps organisés qui vivaient à l'époque où se formait le terrain qui les renferme. Ces débris organiques servent à caractériser les différents âges du globe, et à distinguer les couches dont il se compose.

Formation. — On désigne par le mot *formation* un dépôt qui a été produit d'une manière déterminée, comme par les volcans, par les eaux de la mer ou par les eaux douces. Ce mot désigne encore un ensemble de dépôts qui représente une certaine période de temps continue.

Terrain. — On emploie le mot *terrain* pour désigner des sous-groupes établis parmi les formations qui composent les couches du globe; ainsi on dit : *terrain de granite*, *terrain de gneiss*, *etc.*

Sol. — On nomme *sol* un ensemble de formations de terrains qui constituent une des grandes divisions établies dans la série des couches du globe; ainsi on dit : *sol primitif*, *sol secondaire*, *sol tertiaire*.

Terrains primitifs; terrains secondaires. — On a reconnu deux espèces de roches : les unes, qui sont les plus profondes, sont de nature cristalline, presque toutes composées de silicate de potasse, de

soude, d'alumine; elles se présentent en masses très-épaisses et rarement en couches.

Les autres, au contraire, qui sont superposées sur les précédentes, et qui arrivent jusqu'à la surface du sol actuel, sont des couches horizontales ou onduleuses dans les plaines plus ou moins inclinées, selon qu'elles se rapprochent des chaînes de montagnes; elles sont composées de carbonate calcaire entremêlé de cailloux roulés, de sables, de grès formés par des fragments arrachés à des roches différentes, et présentent dans leurs diverses assises des débris d'êtres organisés, végétaux et animaux, qui y ont été successivement enfouis.

De cet aperçu, on peut conclure que les terrains de la première série, ceux qui ne renferment pas de débris d'êtres organisés, existaient avant ces êtres, tandis que ceux de la seconde série ont été formés postérieurement à l'apparition des êtres organisés à la surface du globe.

Les terrains primitifs et les terrains secondaires ont été subdivisés en six ordres. Ainsi, entre les terrains de cristallisation, composés de silicates et privés de débris organiques, et les terrains de sédiment, on trouve des couches de roches appartenant à la première série, intercalées au milieu de couches arénacées, ou de couches contenant les premiers débris d'animaux marins invertébrés, appartenant à des genres de crustacés ou de mollusques, dont il n'existe plus d'analogues ni sur les continents, ni dans les mers, ni même dans les couches plus superficielles. On donne à ces terrains le nom d'*intermédiaires* ou de *transition*, pour rappeler leur position entre les terrains primitifs et les terrains *secondaires*.

Les terrains de sédiment ont été divisés en *terrains secondaires* proprement dits, et en terrains *tertiaires;* les terrains secondaires sont ceux qui, placés au-dessus des terrains intermédiaires, commencent à montrer des débris d'animaux vertébrés, d'abord de poissons et de reptiles, puis ensuite d'oiseaux.

Les terrains tertiaires sont ceux qui, superposés aux grands dépôts de craie, nous offrent des débris de mammifères ou d'autres animaux perdus, ou dont il existe encore des représentants, et quelquefois même des espèces tout à fait identiques parmi celles qui vivent actuellement encore à la surface de la terre. Enfin, la surface la plus superficielle de nos continents, se compose de couches meubles d'une origine très-récente, relativement à celle des autres terrains, et dont la formation peut être attribuée au déluge : on les nomme *terrains diluviens*. On arrive donc ainsi à cinq divisions :

1° *Terrains primitifs;* 2° *terrains intermédiaires;* 3° *terrains secondaires;* 4° *terrains tertiaires;* 5° *terrains diluviens;* enfin, on forme une sixième division, qui comprend les *terrains volcaniques*.

TERRAINS MASSIFS DE CRISTALLISATION OU DE FORMATION IGNÉE, ET TERRAINS STRATIFIÉS OU DE FORMATION AQUEUSE.

La partie solide du globe est formée de plusieurs produits que l'on peut considérer comme appartenant à deux sortes de formations; les uns sont le produit de la fusion à l'intérieur du globe et sont ensuite

expulsés au dehors : ils comprennent les granites avec leurs diverses modifications, les porphyres avec leurs variétés, les roches compactes et particulièrement les divers silicates : ce sont les terrains de *cristallisation* ou de formation *ignée; les terrains stratifiés* ou de formation *aqueuse* sont formés par sédiment et sont constitués par des cailloux roulés, des sables, des limons et des calcaires dont le nombre de variétés est très-grand.

TERRAINS MASSIFS DE CRISTALLISATION.

La base de ces terrains est la silice et les divers silicates, dont les uns sont de fusion, et les autres sont des terrains métamorphiques. On désigne ces matières sous le nom de *feldspaths, micas, amphiboles, pyroxènes, serpentines* et *diallages*. Elles constituent des roches qui sont ou simples ou composées. Les roches simples comprennent :

Le *quartz* vitreux ou *lithoïde*, plus ou moins schisteux, comme dans le *quartz lydien;*

Les divers *feldspaths* compactes, qui constituent les *pétrosilex;*

Les *amphiboles*, qui forment les roches appelées *amphibolites;*

Les diverses *serpentines*, tant celles qui présentent des mamelons plus ou moins considérables, que celles qui présentent dans leur cassure des lamelles de matières qu'on nomme *diallages* et que, pour cette raison, on a nommées *serpentines diallagiques*.

Les roches composées sont : le *granite*, formé d'*orthose*, de *quartz* et de *mica* unis et constituant des masses granuleuses.

La *siénite*, roche assez semblable au granite, dans laquelle le mica est remplacé en tout ou partie par l'amphibole.

Le *gneiss*. On le connaît encore sous le nom de *granite stratifié*. On donne ce nom au granite et à la siénite, lorsqu'au lieu de présenter une structure massive cristalline, ils passent à l'état de matières schisteuses sans perdre leurs principes constituants.

La *dolérite*. Elle ressemble à certaines variétés de siénites et de diorite; elle est formée de labrador lamellaire et de pyroxène; elle renferme aussi quelquefois de l'amphibole.

Les *scories* et *ponces*. Ces substances sont des roches poreuses produites par l'action des gaz sur les matières fondues dans les volcans. Les *scories* sont noires ou d'un brun rougeâtre; elles constituent l'écume des laves basaltiques ou pyroxéniques. La *pierre ponce* est une substance spongieuse, résultant de l'action des gaz sur les laves trachytiques et autres.

Les *laves* sont des produits volcaniques résultant de diverses roches fondues, telles que les *trachytes, obsidiennes, basaltes, etc.*

Le *basalte* est une roche volcanique qui n'est autre chose que la dolérite compacte; elle contient souvent disséminés des cristaux de pyroxène, du péridot et parfois de mica noir.

Le *trachyte* est une roche volcanique porphyrique, formée de feldspath vitreux, de cristaux de ce même minéral et ordinairement d'amphibole.

Le *trapp* passe tantôt aux basaltes, tantôt à la diorite compacte. Les trapps forment des masses disposées en gradins, ce qui leur a valu leur nom.

Les *roches porphyriques* sont des roches volcaniques composées, qui, dans une pâte compacte feldspathique, renferment des cristaux distincts d'une autre substance, le plus souvent du feldspath. On les connaît sous le nom de *porphyre;* il y en a de diverses espèces, les *porphyres euritiques,* les *porphyres verts* ou *ophites,* les *porphyres noirs* ou *mélaphyres,* les *porphyres quartzifères* et *argileux* ou *argilophyres.*

Les roches *feuilletées* ou *schisteuses*, composées des lames de mica entremêlées avec des lits de quartz et formant ainsi des masses divisibles en feuillets plus ou moins minces. Ils constituent alors ce qu'on appelle *schistes micacés* ou *micaschistes* et *schistes talqueux.* Les schistes argileux sont des roches qui ne renferment que peu ou pas de quartz. C'est à cette espèce de roche qu'appartient le *schiste ardoise,* communément *ardoise.* Les ardoises sont réputées bonnes lorsqu'elles ne contiennent pas de pyrites disséminées et qu'elles n'imbibent pas l'eau.

Les *roches calcaires cristallines* résultent de calcaire sédimentaire modifié par le voisinage des roches en fusion.

DES GRANITES ET DES PORPHYRES.

On peut observer le granite en une foule de points de l'Europe, mais en France les roches granitiques ne constituent que cinq massifs indépendants les uns des autres. Le premier massif est celui qui forme les montagnes anciennes du centre de la France ; il comprend le Limousin, l'Auvergne, le Forez, le Vivarais et les Cévennes; son point culminant se trouve vers le Cantal.

Le second massif, situé à l'ouest, comprend la Normandie, la Bretagne et la Vendée.

Le troisième correspond aux montagnes des Vosges;

Le quatrième aux Pyrénées;

Le cinquième aux Alpes.

Le premier massif granitique surgit au milieu des terrains secondaires comme une île immense, dont la forme est celle d'une ellipse peu allongée. Sa largeur, généralement considérable, est d'environ 70 lieues sous le parallèle de Limoges. Sa surface, quoique ondulée, conserve une hauteur assez constante de 750 mètres au-dessus de la mer. Quelques sommités s'élèvent au-dessus du niveau général ; mais elles n'altèrent que faiblement la régularité de ce massif de montagnes, dont la disposition générale est indiquée très-exactement par le nom de *plateau central de la France.* Ce massif, sensiblement horizontal à l'époque de sa formation, paraît avoir été soumis depuis à une action diluvienne puissante qui a raviné sa surface dans tous les sens ; de sorte qu'aujourd'hui, malgré son niveau général, le plateau central de la France présente plusieurs massifs de montagnes élevées, ainsi que quelques arêtes saillantes qui forment de véritables chaînes; telles sont les montagnes de la Margeride et de la Lozère dans les Cévennes : elles dominent tout le pays, et par la rapidité de leurs pentes elles semblent former des îles au sein d'une mer granitique. Il est probable que leur formation est antérieure au dépôt du terrain houiller, car on rencontre de nombreux galets de granite à gros grains dans quelques-uns des terrains houillers de l'Allier et de la Dordogne.

Parmi les chaînes qui sillonnent la surface du plateau central de la France, plusieurs prennent naissance dans les montagnes de l'Ardèche et de la Lozère. Elles divergent d'abord, mais bientôt elles courent parallèlement et se dirigent assez exactement du sud au nord, comme les vallées de l'Allier, de la Loire et de la Saône qu'elles séparent et dont elles ont déterminé la formation. Ces arêtes constituent les montagnes du Forez, la chaîne de Tarare, et les crêtes saillantes du Beaujolais et du Morvan.

La composition de ces chaînes présente des différences assez notables avec les roches des parties du plateau qui forment l'Auvergne et le Limousin. Plusieurs circonstances, entre autres la présence de masses considérables de porphyre quartzifère, peuvent faire penser que ces chaînes, formées en même temps que tout le massif du plateau, ont été modifiées postérieurement. L'identité de nature et de direction de ces arêtes conduit en outre à présumer qu'elles ont une origine commune, différente de la cause qui a présidé à la formation de la masse générale du plateau.

Un fait remarquable fournit le moyen de préciser l'époque de la formation des chaînes du Forez et de Tarare : c'est que dans les petites vallées de la Loire et de l'Allier qui leur correspondent, il n'existe pas de dépôts de terrains secondaires, tandis que ces terrains forment des bandes continues sur tout le pourtour du plateau. La dislocation qui a produit le pli de terrain correspondant aux vallées de l'Allier et de la Loire, est donc postérieure au dépôt des terrains secondaires. La disposition des roches qui forment les chaînes de Tarare et du Forez, lesquelles présentent une double pente, conduit en outre à admettre que l'ouverture des deux vallées est une conséquence de la formation de ces chaînes : mais, entre la première formation du plateau granitique et le moment où les chaînes dont il s'agit ont pris définitivement leur forme actuelle, il s'est passé une longue série de phénomènes géologiques, au nombre desquels on doit compter l'apparition des porphyres quartzifères qui les forment en partie.

Les granites du Morvan constituent également une chaîne particulière, plus moderne que l'ensemble des montagnes du centre de la France.

Le plateau central est presque entièrement composé de granite et de gneiss. Une bande mince de schiste micacé se montre en quelques points, à la séparation des terrains anciens et des terrains secondaires. Des porphyres quartzifères y forment aussi de distance en distance quelques crêtes saillantes et constituent plusieurs massifs importants.

Les granites présentent des variétés très-nombreuses ; on doit surtout en distinguer deux, dont les caractères extérieurs sont très-tranchés, et qui jouent dans la constitution géologique de la contrée, ainsi que dans la nature du sol, des rôles très-différents : le premier à petits grains est composé de feldspath blanc, de quartz gris et de mica noir ; il est assez souvent associé à du gneiss, auquel il passe par degrés insensibles. Il en résulte qu'il est fort difficile d'assigner d'une manière précise la limite de ces deux roches, qui paraissent former

la base générale des montagnes anciennes de la France. La seconde espèce présente une teinte de gris clair ou d'un rose pâle; elle contient presque toujours deux feldspaths différents par leur couleur et par la netteté de leurs clivages; l'un, composant la pâte de la roche, rose, nacré, présente un clivage indistinct; l'autre au contraire, presque toujours en gros cristaux, donne à la roche une teinture particulière, qui la fait distinguer sous le nom de granite *porphyroïde*. Ce feldspath est très-lamelleux. Le granite porphyroïde n'est pas associé à du gneiss, il forme constamment des montagnes qui se dessinent en relief, sur la surface générale du plateau.

Quand la seconde variété de granite est en contact avec le granite à petits grains, elle présente des passages presque insensibles à cette dernière roche, de sorte qu'on pourrait croire que ces deux variétés de granite sont contemporaines; mais quand on les considère dans leur ensemble, le granite à gros cristaux est visiblement plus moderne; on reconnaît qu'il forme des espèces de murs, qui se sont élevés d'un seul jet, au-dessus du granite à petits grains; quelquefois même la première variété de granite forme des filons dans la seconde. Dans les environs de Tulle, on peut observer des exemples d'autant plus intéressants de ces filons, que le granite qui les forme est composé de volumineux cristaux de feldspath, de quartz hyalin et de mica argentin, et en outre de gros cristaux de tourmaline noire.

L'abondance des roches feldspathiques donne aux montagnes du centre de la France une physionomie particulière. Elles sont toujours arrondies, et suivant la facilité avec laquelle les roches se désagrégent, leur surface est couverte de rochers ou de sable; ce sable, quand il contient une quantité un peu considérable de feldspath et quelques paillettes de mica, est désigné sous le nom particulier d'*arène*. Le feldspath, en s'y décomposant, produit une argile qui donne aux arènes des propriétés qui les font rechercher comme pouzzolanes par les construoteurs. Les arènes donnant des pouzzolanes forment souvent des couches épaisses dans les montagnes de la Bourgogne, du Périgord et du Limousin.

Les gneiss, plus durs et plus résistants que les granites, se décomposent très-difficilement et produisent un sol complétement stérile.

La terre produite par la destruction du granite est connue sous le nom de *terre de bruyère;* le seigle, le sarrazin, les pommes de terre sont les seules plantes utiles qu'on peut y faire venir dans l'état actuel de la culture; mais cette terre est très-propre pour la culture du châtaignier, qui fournit la principale nourriture aux habitants pauvres du pays.

Le granite et le gneiss ne sont pas les seules roches qui entrent dans la composition du plateau central, il y a encore le schiste micacé; mais ces roches, liées d'une manière intime au gneiss, passent en un grand nombre de points au schiste argileux, en sorte qu'on est conduit à les considérer comme appartenant à des terrains paléozoïques métamorphisés.

L'exemple, cité plus haut, de filons de granites à gros cristaux qui ont traversé les granites à petits grains des environs de Tulle, fournit la preuve que les roches granitiques ont apparu à la surface de la

terre à des époques différentes, et que, par suite, il y a des granites d'âge différent.

Il résulte des observations faites dans plusieurs pays, que les roches granitiques se sont fait jour à des époques différentes, et quand on voit des couches sédimentaires s'appuyer sur des masses granitiques, sous des inclinaisons très-variables par rapport à l'horizon, on est conduit à conclure que ces couches, primitivement horizontales, ont dû être relevées et qu'alors la masse de granite n'est venue au jour qu'à la suite du dépôt de ces couches sédimentaires : c'est ainsi qu'en se rendant compte des rapports qui existent entre les cinq massifs granitiques de la France et les couches de terrains sédimentaires qui sont en connexion avec eux, on reconnaît que le plateau central de la France est le plus ancien ; que les granites de la Bretagne sont antérieurs au dépôt du terrain carbonifère, mais postérieurs au système dévonien ; que le massif des Vosges est plus ancien que le terrain houiller, mais antérieur au trias ; que la chaîne des Pyrénées, depuis Bayonne jusqu'aux environs de Belesta, est postérieure au dépôt de la craie et antérieure au terrain tertiaire ; mais qu'à partir de Belesta, la chaîne, au lieu de conserver sa direction de l'O. 16° N. à l'E. 16° S., tourne brusquement vers le nord-est, ce qui montre que les Pyrénées orientales se sont soulevées postérieurement et probablement à la même époque que la chaîne principale des Alpes.

Les Alpes sont formées de deux chaînes distinctes, dont l'origine est due à deux révolutions successives. La *chaîne des Alpes occidentales*, la plus ancienne des deux, s'est soulevée entre le dépôt des terrains tertiaires moyens et celui des terrains tertiaires supérieurs, et la seconde, la *chaîne principale des Alpes*, a mis fin au dépôt des terrains tertiaires supérieurs. Le massif du Mont-Blanc, qui appartient à la chaîne principale, est composé de protogine, de cette variété de roche granitique, dont le quartz, l'albite et le talc forment la substance.

Porphyres. — Le plateau central de la France est aussi composé de roches porphyriques ; les montagnes qui séparent la Saône de la Loire, sur une surface de 1250 kilomètres carrés environ, sont entièrement porphyriques. Le Morvan offre un second exemple d'un massif de porphyre aussi considérable, et toutes les montagnes entre Autun et Lorme sont formées par le porphyre rouge quartzifère.

Ces porphyres constituent des masses distinctes de granites appartenant à des époques de formations très-différentes ; cependant les porphyres, dans quelques points, présentent des passages gradués vers les granites, qui montrent quelles liaisons rattachent les unes aux autres les roches feldspathiques.

On distingue deux espèces de porphyres : le porphyre granitoïde, le porphyre quartzifère.

Les porphyres granitoïdes ressemblent beaucoup aux granites; mais le sol composé de porphyre granitoïde a un aspect fort différent du sol granitique; l'absence complète de pâte feldspathique fait que les granites sont peu solides, se désagrègent facilement, et que leurs escarpements sont arrondis ; les porphyres granitiques, au contraire, sont des roches dures, résistantes, et leurs rochers sont aigus et découpés.

Les porphyres quartzifères sont composés le plus ordinairement

d'une pâte de feldspath rouge, compacte, avec des cristaux de feldspath rose lamelleux et de grains de quartz hyalin gris, souvent même complétement cristallisés. Cette variété de porphyre n'est pas la seule; ainsi il existe des porphyres gris clair, et d'autres dans lesquels le feldspath est brun ou vert; toutes ces variétés de roches porphyriques passent les unes aux autres, et se trouvent dans des circonstances identiques.

Cette classe de porphyre est plus moderne que le porphyre granitoïde; en effet, les porphyres quartzifères ont dérangé par leur arrivée au jour, les terrains houillers, tandis que les porphyres granitoïdes sont antérieurs à ces terrains, et de plus les porphyres quartzifères se montrent en filons dans le porphyre granitoïde.

Dans les Vosges, il existe des massifs porphyriques très-remarquables qui jouent un grand rôle dans la constitution géologique de ces montagnes.

Les montagnes des Vosges ont été le théâtre de phénomènes éruptifs dont on peut résumer brièvement l'ordre de succession ainsi qu'il suit : Les premières roches qui se sont fait jour sont les roches granitiques, qui composent la masse centrale des Vosges; elles ne forment pas de cimes élevées dans le nord de ces montagnes, mais dans leur partie méridionale les cimes granitiques deviennent plus élevées; elles se séparent les unes des autres et forment les ballons des Vosges. Ces masses granitiques ayant passé un temps fort long à se refroidir, il en est resulté des tassements et des fentes dans lesquelles ont eu lieu les éruptions des porphyres quartzifères qui se lient quelquefois d'une manière si intime avec les granites. Les porphyres bruts ont apparu ensuite dans le midi des Vosges; des masses de syénites sont ensuite venues soulever et bouleverser les porphyres bruns; l'éruption des porphyres rouges quartzifères a suivi les phénomènes précédents; elle a été accompagnée de la formation de ces masses de conglomérats qui ont produit le grès rouge, en comblant de leurs débris, par l'action de la mer, les bassins des Vosges. Après cette éruption, a eu lieu celle des mélaphyres, qui ont accidenté les porphyres bruns, déjà bouleversés par la venue au jour de la syénite. La série de ces phénomènes a été close par la formation, à quelques points du pied des Vosges, de petites coulées basaltiques.

On peut diviser en trois groupes d'origine différente les terrains porphyriques du département du Var : les porphyres rouges quartzifères, les mélaphyres et les porphyres bleus quartzifères.

Le porphyre rouge quartzifère constitue presque à lui seul le massif entier des montagnes de l'Estérel; les pics décharnés, les escarpements à dentelures irrégulières qu'il forme, donnent à ces montagnes un aspect très-pittoresque. L'époque de l'arrivée au jour de ces porphyres est révélée dans les localités de Pennafort et de San-Peyré. Le vallon de Pennafort, au-dessous du petit Esclans, est entaillé dans le massif du porphyre rouge, dont les grands escarpements verticaux s'élèvent des deux côtés du torrent. On rencontre à la base de ces escarpements un système de couches d'argiles et de grès micacés rougeâtres, appartenant à la formation du grès bigarré que l'on voit passer au-dessous des porphyres qui le recouvrent de leurs grandes

masses prismatiques; cette disposition est indiquée dans la *fig.* 1, *Pl. IV.* P porphyre rouge, A grès bigarré antérieur au porphyre, B conglomérats porphyriques, C grès bigarré postérieur au porphyre.

Ce système de grès et d'argiles ne contient aucun fragment de porphyre rouge; mais vers Esclans des conglomérats et des grès bigarrés (B et C) recouvrent les porphyres rouges au détriment desquels ils sont presque entièrement formés. Cette coupe intéressante démontre que le porphyre rouge quartzifère s'est fait jour pendant la période du dépôt des grès bigarrés. Les porphyres rouges à Pennafort et à San-Peyré présentent une division prismatique; les prismes sont perpendiculaires à la surface des couches de grès que ces masses recouvrent. Or les couches de grès sont inclinées à l'horizon; il en résulte que le redressement de ces grès est dû à un phénomène postérieur à la venue au jour des porphyres rouges qui les recouvrent.

Le porphyre bleu quartzifère est une roche dont la pâte est composée en partie de feldspath oligoclase et en partie d'albite. Sa couleur dominante est le bleu turquin, d'un ton un peu pâle. La roche est formée de la réunion de petits cristaux d'albite traversés de plus gros cristaux; elle renferme aussi du quartz et de l'amphibole d'un vert sombre. Ces porphyres constituent les montagnes arrondies du vallon d'Aigues-Bonnes, des Ferrières et Boulouris; ils s'enfoncent sous les escarpements des porphyres rouges de l'Estérel.

Des granites et des porphyres comme matériaux de construction.

Le granite est une roche très-dure, ce qui fait qu'on ne peut l'employer d'une manière générale comme pierre de taille. Dans quelques localités on trouve le granite divisé en bancs naturels, et, dans ce cas, il est d'un emploi avantageux. En France on voit fort peu de constructions en granite; on en fait seulement un fréquent usage pour les trottoirs et le couronnement des murs de quai. La Normandie fournit les granites employés dans les trottoirs de Paris.

Les constructions en granite, bien que fort solides, se détériorent un peu extérieurement; cette détérioration résulte de la tendance qu'ont ces roches à s'altérer plus ou moins vite, quand elles sont soumises à de fréquentes alternatives de sécheresse et d'humidité. Le granite amphibolique (syénique) de l'Égypte est une des roches les plus inaltérables connues; on peut s'en convaincre en examinant les hiéroglyphes de l'obélisque de la place de la Concorde; la conservation de ces sculptures fait croire quelles sont sorties depuis quelques jours seulement des mains de l'artiste.

Si le prix élevé de la taille empêche d'employer d'une manière générale le granite comme pierre d'appareil, cette roche est constamment utilisée comme moellons dans les contrées où elle forme le sol.

Le granite fournit d'excellents matériaux pour l'empierrement des routes.

Les granites, par leur décomposition spontanée, fournissent d'excellentes pouzzolanes dont l'énergie est d'autant plus grande que la décomposition est plus avancée.

Le gneiss est fréquemment employé, dans le Limousin, pour les constructions, à cause de sa division schisteuse.

Les porphyres sont susceptibles de recevoir un beau poli; aussi ces roches sont-elles employées pour la décoration des monuments importants. Les musées d'Italie renferment un grand nombre de statues et de vases de porphyre.

TERRAINS SÉDIMENTAIRES STRATIFIÉS OU DE FORMATION AQUEUSE.

Ces terrains sont caractérisés par la composition des roches qui les constituent, par la nature des fossiles qu'elles renferment, par leur rapport de superposition et par les différents modes d'inclinaison. Le carbonate de chaux est le produit dominant de ces terrains.

Terrains de sédiment. — Quand on ouvre une tranchée profonde, on reconnaît qu'il existe une série successive de couches superposées les unes aux autres dans un ordre constant, et s'il était possible qu'on pût pratiquer une excavation suffisante dans une localité où tous les terrains de sédiment se trouveraient réunis, on rencontrerait une série d'étages très-différents les uns des autres et ayant des caractères distinctifs très-tranchés; mais, comme il a été impossible d'étudier en aucun lieu la série complète des terrains de sédiment, on a dû combiner les observations recueillies en différentes localités pour établir la succession de ces assises de sédiment, telle qu'elle se présente dans le tableau suivant :

Groupes des couches fossilifères observées dans la partie occidentale de l'Europe et classées par ordre de série descendante, c'est-à-dire en commençant par les plus modernes.

Alluvions modernes.....	Blocs erratiques. Alluvion.
Groupe tertiaire ou supercrétacé..........	Terrain subapennin. — Dépôts de la Bresse; collines subapennines. Terrain de mollasse. — Faluns; mollasse. Terrain parisien. — Gypse; calcaire grossier; argile.
Groupe secondaire ou ammonéen...........	Terrain crétacé. — Craie blanche; craie marneuse; craie tufau; craie verte; grès vert; dépôts de wealds. Terrain jurassique. — Oolithe; lias. Terrain triasique. — Marnes irisées; calcaire conchylien; grès bigarré.
Groupe primaire.......	Terrain pénéen. — Calcaire pénéen; grès rouge. Terrain houiller. — Grès houiller; calcaire carbonifère. Terrain dévonien. — Vieux grès rouges. Terrain silurien. — Calcaire et schistes charbonneux. Terrain cambrien. — Calcaire et schiste.
Groupe métamorphique. Groupe plutonique.....	Les terrains qui composent ces deux groupes ne sont pas fossilifères.

Rapports de superposition. — On peut déterminer l'âge d'un dépôt de sédiment, comparativement à celui d'un autre dépôt, par l'examen

de sa position relative. En effet, dans une série de couches horizontales, la strate supérieure est la plus récente, de même que celle qui sert de base aux autres est la plus ancienne. Lorsqu'on rencontre des couches courbées, inclinées ou verticales, on voit que l'ordre de superposition primitif offre des doutes, et alors on essaye de trouver dans les lieux environnants quelques coupes dont les couches se rapprochent de la position horizontale. Si l'on réussit dans cette recherche, on en conclut que la courbure, l'inclinaison ou le redressement des premières couches, n'ont pas une extension considérable, puisqu'un tel dérangement n'a pas pu s'accomplir sur un grand espace, sans laisser des traces de perturbation.

Les discordances de stratification dans les terrains de sédiment ont une grande importance pour déterminer l'âge des différents dépôts; car, si quelques-uns se rencontrent en couches inclinées, tandis que d'autres leur sont superposés en strates horizontales, on doit nécessairement en conclure que les premiers ont été produits avant une certaine catastrophe qui les a redressés. On voit donc là deux périodes de formation séparées par un bouleversement qui indique positivement deux époques géologiques très-différentes.

Les restes organiques peuvent encore aider à reconnaître l'âge d'une formation. Ainsi, lorsqu'on suit les couches dans la direction de leurs plans, on retrouve souvent les mêmes fossiles sur de très-grandes étendues. Lorsqu'il y a diversité dans les fossiles, le caractère minéralogique de la roche reste souvent constant; quelquefois, au contraire, les fossiles restent les mêmes et la nature lithologique de la roche varie. De cette manière on peut reconnaître l'origine contemporaine de la même formation, puisqu'à défaut de l'un des moyens d'épreuve, l'autre existe et peut servir de moyen de détermination.

PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES DE L'ÉPOQUE ACTUELLE.

Tremblements de terre. — Les récits des historiens, la tradition, l'examen de la croûte du globe, les faits contemporains, tout concourt à nous faire admettre que les tremblements de terre ont eu une grande influence pour modifier la surface de la terre.

La cause des tremblements de terre n'est pas encore bien connue, et peut-être ces grands bouleversements sont-ils déterminés par des causes différentes. Quelques-uns des géologues pensent qu'il existe une relation intime entre les tremblements de terre et les phénomènes volcaniques; voici comment M. de Humboldt s'exprime à cet égard : « La haute colonne de fumée que le volcan de Pasto, à l'est du cours de la Guaytara, vomit pendant trois mois en 1797, disparut à l'instant même où, à une distance de 60 lieues, le grand tremblement de terre de Rio-Bamba et l'éruption boueuse de la Moga firent perdre la vie à 40000 individus. L'apparition soudaine de l'île de Sabrina, dans l'est des Açores, le 30 janvier 1811, fut l'annonce de l'épouvantable tremblement de terre qui, bien plus loin, à l'ouest, depuis le mois de mai 1811, ébranla presque sans interruption, d'abord les Antilles, ensuite les plaines de l'Ohio et du Mississipi, enfin les côtes de Venezuela situées du côté opposé. Trente jours après la destruction de la ville de Caracas, arriva l'explosion du volcan de Saint-Vincent, île des petites Antilles éloignée

de 130 lieues de la contrée où s'élevait cette cité. Au moment même où cette éruption avait lieu, le 30 avril 1811, un bruit souterrain se fit entendre et répandit l'effroi dans toute l'étendue d'un pays de 2200 lieues carrées. Les habitants des rives de l'Apure, au confluent du Rio-Nula, de même que ceux de la côte maritime, comparèrent ce bruit à celui que produit la décharge de grosses pièces d'artillerie. Or, depuis le confluent du Rio-Nula et de l'Apure jusqu'au volcan de Saint-Vincent, on compte 157 lieues en droite ligne. L'intensité de ce bruit était à peine plus considérable sur les côtes de la mer des Antillès, près du volcan en éruption, que dans l'intérieur. »

M. Boussingault combat cette opinion et s'exprime ainsi : « Les tremblements de terre les plus mémorables de l'Amérique, ceux qui ont ruiné les villes de Latacunga, Rio-Bamba, Hunda, Caracas, la Guayra, Barquisimoto, et dans lesquelles plus de 100000 personnes ont perdu la vie, n'ont coïncidé avec aucune éruption volcanique bien constatée. Dans les Andes, l'oscillation du sol due à une éruption volcanique est pour ainsi dire locale; tandis qu'un tremblement de terre qui, en apparence du moins, n'est lié à aucune action volcanique, se propage à des distances incroyables; et, dans ce cas, on a remarqué que les secousses suivaient de préférence la direction des chaînes de montagnes. Le tremblement qui détruisit Caracas en 1812, exerça son action suivant la direction de la Cordilière orientale des Andes, en renversant comme des châteaux de cartes toutes les villes situées dans cette direction. On a remarqué cependant que les tremblements de terre sont plus fréquents dans les contrées où il y a des volcans que dans celles où il n'y en a pas; ils sont plus communs aussi dans les pays de montagnes que dans ceux des plaines, et ils ont une certaine tendance à agir de préférence dans les lieux qu'ils ont déjà secoués. C'est ainsi qu'on ne cite point de tremblement de terre réellement désastreux dans le nord de l'Europe, tandis que plusieurs villes du Midi ont été détruites par ces terribles phénomènes. Mais c'est surtout dans la chaîne des Andes que les tremblements de terre exercent leurs ravages le plus fréquemment; ils s'y répètent si souvent, qu'il y a tout lieu de présumer que, si l'on enregistrait dans les endroits peuplés de l'Amérique tous les tremblements de terre qui s'y font sentir, on trouverait probablement que la terre tremble presque sans interruption. »

Voici la théorie que M. Boussingault avance sur la cause des tremblements : il les attribue à un tassement qui s'opère dans les montagnes. Partant de l'idée que celles-ci ont été formées par un soulèvement, il suppose que quand les Andes ont été soulevées, le terrain trachytique, qui en forme la masse principale, était à l'état de solidité rigide et susceptible de se fracturer plutôt que de se prêter à un changement de forme. A l'appui de cette opinion, il cite la circonstance que les énormes blocs de trachyte que l'on voit sur ces montagnes ont des angles aigus, souvent même tranchants, et qu'ensuite là où le trachyte a percé et soulevé des couches de schistes, comme au Tunguragua, ou de micaschistes, comme à l'Antisana, on ne voit nullement un déversement de la roche soulevante sur la roche soulevée. On conçoit que, dans ce cas, l'immense quantité de fragments

anguleux qui se sont formés et qui se sont entassés confusément les uns sur les autres, a laissé une infinité de vides entre eux; que ces vides tendent successivement à se combler par un tassement analogue à celui qu'éprouvent les tas de décombres formés par les travaux de l'homme, et que les gaz renfermés dans les cavités qui se remplissent par les matières solides qui s'éboulent, doivent tendre à s'échapper et agiter le sol dans leur mouvement.

Pour appuyer sa théorie, M. Boussingault se base sur l'abaissement successif des montagnes; toutes les mesures qu'il a prises dans les Andes annoncent des hauteurs moindres que celles qui avaient été données trente ans auparavant par Caldas et M. de Humboldt.

Il paraît donc, d'après ce qui précède, que des affaissements ont pu donner lieu à des tremblements de terre; mais il est à croire aussi que plusieurs de ces grandes perturbations ont été déterminées par les mêmes causes que celles qui forment des volcans, et l'on comprend très-bien qu'une grande éruption volcanique pourra prévenir un tremblement de terre.

Soulèvements et affaissements. — Les phénomènes de soulèvements et d'affaissements dont la réalité est parfaitement constatée paraissent tenir aux mêmes causes que les tremblements de terre. Tous les géologues admettent aujourd'hui que la terre ferme, par suite de soulèvements et d'abaissements successifs, a éprouvé des changements de niveau par rapport à celui de la mer. Cette hypothèse rend compte non-seulement de la position élevée des masses d'origine marine, dans lesquelles la stratification demeure horizontale, mais de plus elle est d'accord avec l'observation bien constatée du soulèvement graduel qu'éprouvent les continents en certains endroits et de leur abaissement en d'autres localités. Plusieurs changements de ce genre ont été observés de nos jours; d'autres s'accomplissent encore aujourd'hui, et ces phénomènes, qui, dans certaines circonstances, sont accompagnés de perturbations violentes, se manifestent d'autres fois d'une manière insensible et ne sont appréciables qu'à l'aide d'observations délicates.

Volcans. — Les phénomènes volcaniques ont attiré, de tout temps, l'attention des naturalistes; ils paraissent dépendre des mêmes causes qui déterminent les tremblements de terre et les soulèvements. Si l'on en juge par les restes volcaniques qu'on trouve dans un grand nombre de localités aujourd'hui tranquilles, ces phénomènes devaient jadis se produire très-fréquemment. Cependant il est encore plusieurs volcans en activité qui suffisent pour nous indiquer combien sont grandes les perturbations déterminées par ces causes. L'histoire nous a transmis la relation de plusieurs éruptions volcaniques célèbres. On n'a point oublié l'éruption de l'an 79 après J.-C., qui produisit un si grand bouleversement, qui précipita une partie de la montagne dans la mer, et qui ensevelit Herculanum, Stabia et Pompéi sous d'immenses débris de ponces. On croit aujourd'hui que les volcans établissent une communication facile entre l'intérieur de la terre qui est embrasé et l'extérieur. Sous ce point de vue, les volcans peuvent être considérés comme des préservatifs contre les tremblements de terre. Les volcans n'apparaissent pas toujours sur la terre; on a signalé

plusieurs éruptions sous-marines ; beaucoup d'îles et un grand nombre de récifs n'ont pas d'autre origine.

Les phénomènes volcaniques donnent lieu, en général, à des soulèvements; mais ils produisent aussi des affaissements, et font quelquefois disparaître des montagnes considérables. L'exemple le plus mémorable de cette catastrophe est celui du volcan de Popadayan, dans l'île de Java, qui s'enfonça en 1792 avec quarante villages bâtis sur ses flancs, et fut remplacé par un lac de plusieurs kilomètres de diamètre.

Théorie des volcans. — Si l'on compare la terre à une immense chaudière contenant, dans son intérieur, des matières embrasées et des gaz comprimés qui tendent à s'échapper avec une grande puissance, on peut admettre que les volcans sont les fissures naturelles de cet immense réservoir. On a calculé la force dont doivent être animées les matières qui sont vomies par les volcans. On peut y arriver en prenant en considération la hauteur des cratères des volcans et la densité des produits lancés dans les airs. Ainsi le cratère de l'Etna est de 3300 mètres au-dessus des mers, le pic de Ténériffe à 3710 mètres, le sommet de l'Antisana à 5833. On peut calculer en pressions atmosphériques le poids de la colonne des laves que la force intérieure a dû soutenir pour la déverser à ces hauteurs. Si cette colonne eût été de l'eau, ce liquide se tenant à $10^{m},5$ par la pression atmosphérique, il faudrait plus de 300 atmosphères pour le soutenir au sommet de l'Etna, plus de 350 au pic de Ténériffe, plus de 550 à l'Antisana. Mais le poids spécifique des laves, à l'état solide, étant entre 2 et 3, il a fallu pour l'Etna entre 600 et 900 atmosphères, pour l'Antisana près de 1500, pour élever les laves à la hauteur à laquelle on les observe.

M. de Buch divise les volcans en *volcans centraux* et en *chaînes volcaniques*. On distingue encore les *volcans éteints*, et les *volcans en activité*. Parmi ces derniers, les plus remarquables sont ceux de l'Amérique méridionale Les uns s'étendent au sommet des Andes, sur une ligne de près de 1500 myriamètres, dirigée dans le sens du continent; les autres forment, dans le Méxique, des lignes qui, au contraire, traversent le continent de l'est à l'ouest. En Europe, on remarque principalement l'Etna, le Vésuve et le Stromboli, dans le royaume des Deux-Siciles; en Afrique, les volcans des îles Canaries et de l'île Bourbon, et en Asie, ceux du Kamtschatka et des îles de la Sonde. Les volcans en activité sont très-abondants dans l'Océanie. En résumé, M. Ordinaire compte 205 volcans brûlants dont 107 sont dans les îles et 98 sur les continents, mais en général à de petites distances des mers. Ce nombre est certainement inférieur à la réalité, car on a également signalé des volcans dans l'intérieur, soit de l'Asie, soit de l'Afrique.

Alluvions. — On emploie les mots *alluvium* et *diluvium* par opposition aux mots strates régulières ou roches en place. La surface du globe offre, en général, une couche de terre végétale, laquelle doit son origine en partie à des débris de plantes. Quelquefois il arrive qu'immédiatement au-dessous de cette terre végétale se présentent les roches régulières stratifiées ou non stratifiées, propres à la région

qu'on connaît; mais entre la première couche et ces roches, on rencontre ordinairement, sinon une masse d'alluvion, du moins une certaine quantité de fragments brisés et angulaires, provenant de la roche sous-jacente. Ces fragments peuvent être attribués, soit à l'influence atmosphérique, soit à la désagrégation de la pierre sur place, produite par les effets de l'air et de l'eau, du soleil et de la gelée, et par les décompositions chimiques, soit à la force expansive des racines d'arbres qui ont pu jadis prendre croissance dans de petites fissures du rocher. On peut admettre encore qu'à quelque époque ancienne les vibrations des tremblements de terre aient eu assez de force pour briser une surface préalablement crevassée.

Le terrain d'alluvion diffère de celui dont il vient d'être parlé par sa composition, qui consiste non-seulement en sable et en gravier, plus ou moins roulés et en partie locaux, mais souvent aussi en matières transportées d'une assez grande distance. Ce mot *alluvion* veut dire inondation. Rarement le gravier qui constitue l'alluvion est consolidé; quelquefois il est divisé en couches obliques et ondulées qui indiquent les dépôts opérés successivement par les eaux, mais le plus ordinairement il n'offre aucune apparence de stratification, et ressemble, quant à la disposition, à un amas confus de gravier. Les alluvions sont répandues, tantôt sur les couches inclinées, tantôt sur les couches horizontales. On les trouve plus communément dans les vallées; néanmoins, il s'en rencontre aussi sur des plateaux élevés.

La surface inférieure d'un dépôt alluvien est conforme à toutes les inégalités de la roche sur laquelle elle repose. Il n'est pas toujours facile de marquer la ligne de démarcation bien nette entre les roches *fixes* ou strates régulières, et les dépôts d'alluvion. Lorsque le lit d'un torrent est mis à sec, on donne le nom d'*alluvion* au gravier, au sable et au limon qui restent dans son lit, ou aux matières quelconques que, durant les inondations, il n'a pas répandues sur les plaines voisines. Les mêmes matières sont désignées comme des strates régulières lorsque, transportées dans un lac ou dans la mer, l'eau y opère leur triage et les dispose en couches distinctes et ayant les caractères propres. Lorsque dans une formation analogue à celles dont on vient de parler on rencontre des fossiles, la masse conserve la dénomination d'alluvienne, pourvu toutefois que quelque circonstance puisse indiquer le transport de ces fossiles au lieu où on les trouve.

COMPOSITION DE LA CROUTE TERRESTRE.

Division générale. — La croûte du globe est essentiellement composée de deux ordres de produits : les uns ont une origine ignée; les autres sont le résultat de dépôts qui se forment au fond des eaux. On rencontre souvent dans la nature ces deux sortes de produits à l'état de mélange, et presque toujours les derniers ont subi de telles modifications, que l'on a pu longtemps les confondre avec les premiers; c'est ce qui a donné lieu à l'établissement de la classe des *terrains de transition*, dénomination que l'on a complétement abandonnée aujourd'hui, aussi bien que celle de *terrains primitifs*.

Les plus anciens dépôts remontent à une époque très-reculée : car

il a dû s'en former dès le moment où l'eau a pu se déposer à l'état liquide à la surface de la terre. Mais, tandis que nous apercevons des dépôts relativement très-anciens, il est probable que l'on n'est pas encore parvenu à ceux qui durent précéder toute formation organique, puisque les plus anciens sédiments observés jusqu'à ce jour renferment des débris de mollusques et de zoophytes qui ne devaient pouvoir vivre à la température que devait avoir la mer primitive.

Nous avons donné précédemment le tableau des diverses couches dont sont composés les terrains sédimentaires. Il nous reste à examiner les principales divisions. C'est ce que nous allons faire en commençant par les terrains qui se sont les premiers déposés à la surface du globe, ceux qui touchent aux terrains plutoniques.

TERRAINS PRIMAIRES ET DE TRANSITION.

M. Lyell donne à ces roches sédimentaires anciennes le nom de *primaires fossilifères;* Werner les désigne sous le nom de *roches de transition*. Plusieurs géologues les ont nommées *grauwacke*, nom par lequel les mineurs allemands désignent une certaine variété de grès quartzeux, consistant en un agrégat de petits fragments de quartz, de schiste siliceux et de schiste argileux, unis par une substance argileuse. Le vieux grès rouge a été généralement regardé en Angleterre comme formant la base de la série secondaire; mais plusieurs auteurs en font, ainsi que de la formation houillère, les membres supérieurs de la série de transition.

TERRAINS PALÉOZOÏQUES. — LEUR DIVISION EN CINQ SYSTÈMES. — ÉTUDE DU SYSTÈME CAMBRIEN. — ÉTUDE DU SYSTÈME SILURIEN (1).

A mesure qu'on s'approche du granite, qui est la base de la série des terrains, la texture des couches sédimentaires devient de plus en plus cristalline, ce qui fit admettre par les premiers géologues que la perfection dans l'état cristallin des roches était proportionnelle à leur ancienneté, et ils désignèrent sous le nom de *terrains de transition* le groupe de dépôts renfermant ces roches stratifiées plus ou moins cristallines; mais, plus tard, il fallut reconnaître que cet état de cristallisation plus ou moins parfaite, qu'on croyait propre seulement aux terrains de transition, s'était, dans un grand nombre de cas, produit dans tous les points de la série des formations sédimentaires, et qu'ainsi le mot de *transition* ne pouvait plus conserver la signification qu'il avait primitivement reçue. Bien plus, dans certaines localités, le nord de la Russie par exemple, on remarque que les couches du terrain de transition, sensiblement horizontales, sont formées d'argiles, de calcaires et de grès, dont les caractères sont les mêmes que ceux offerts par ces roches dans les formations sédimentaires les plus récentes. Ce fut par l'étude des corps organisés fossiles que plusieurs géologues identifièrent les terrains du nord de la Russie avec

(1) Ces notions sont extraites des Leçons de M. Élie de Beaumont, professeur à la Faculté, et de celles de M. Bayle, professeur à l'École impériale des Mines et des Ponts et Chaussées.

le terrain de transition de la France et de l'Angleterre. Par conséquent, la diversité des caractères minéralogiques que présentent les terrains de transition ne peut plus être invoquée pour contester leur similitude d'origine, elle atteste seulement les altérations plus ou moins profondes que ces terrains ont subies par métamorphisme.

Parmi les roches cristallines qu'on rencontre dans les terrains de transition, nous citerons particulièrement le gneiss et le micaschiste.

Le gneiss est une roche composée des trois éléments de granite : le quartz, le feldspath et le mica. Le gneiss est souvent stratifié, et quelquefois ses strates sont parallèles à l'orientation des lames du mica. On trouve souvent disséminés dans le gneiss des cristaux d'amphibole, de pyroxène, de grenat et des pyrites ; quelquefois encore on rencontre dans le gneiss des couches subordonnées de quartz, de micaschistes et de calcaires cristallins. Ce phénomène s'observe en plusieurs points du plateau central de la France dans le département de la Corrèze et dans celui du Puy-de-Dôme. On exploite, dans ces deux départements, pour la fabrication de la chaux, du calcaire saccharoïde gris, nuancé de blanc. Ce calcaire, parallèle aux strates du gneiss, en suit toutes les ondulations ; vertical comme lui dans le département de la Corrèze, il devient, avec lui, presque horizontal à la carrière de Saverne, dans le Puy-de-Dôme, en se contournant pour former un repli. Il y a passage du gneiss au calcaire ; en effet, le calcaire s'imprègne de lamelles de mica à mesure qu'il s'approche de la roche schisteuse et prend l'aspect d'un marbre rubané, du marbre cipolin. Ce calcaire est donc contemporain du gneiss et appartient au même terrain. Or, quelle que soit la manière dont on envisage la formation du calcaire, soit comme un dépôt chimique, soit comme un entassement de corps organisés fossiles, il est évident que ce calcaire n'a pu être produit que par voie de sédiment dans les eaux, et qu'alors il doit sa structure cristalline au phénomène de métamorphisme qui a produit le gneiss dans lequel il est enclavé.

Le micaschiste est une roche toujours feuilletée, quelquefois en feuillets contournés, essentiellement composée par le mica ; elle est toujours stratifiée et passe souvent au schiste argileux, dont l'origine est sédimentaire, et elle passe aussi par des nuances insensibles au gneiss. Cette roche forme, sur presque tout le pourtour du plateau central de la France, une bande assez mince à la séparation du gneiss et des formations secondaires. On est porté à croire que le micaschiste est dû au métamorphisme du schiste argileux ; on peut en effet observer le passage de ces deux roches l'une à l'autre, en parcourant le terrain depuis le village de Sainte-Féréolle, assis sur le granite, jusqu'aux ardoisières de Traversac, dans le département de la Corrèze. Cette direction, coupant transversalement celle des couches schisteuses, les fait toutes passer en revue. Les premières couches de micaschistes appuyées sur le granite sont brillantes, d'un gris verdâtre ; en suivant d'une couche à l'autre, on voit la teinte passer au gris sombre, puis au brun ; les feuillets deviennent plus nets, plus étendus et plus compactes. On arrive enfin, insensiblement, de ce micaschiste brun aux larges feuillets d'un noir bleuâtre du schiste ardoisier. La dégradation de texture, d'éclat et de couleur a lieu par

des passages tellement insensibles, qu'il est impossible de dire où est la limite entre le schiste micacé et le schiste ardoisier, quoique, cependant, ces deux roches soient différentes à chaque extrémité de la série.

Le micaschiste et le schiste ardoisier sont donc deux roches contemporaines dans la localité qui vient d'être citée. Les gneiss et les micaschistes ne se rencontrent que dans les terrains de transition les plus anciens, et la formation de ces roches atteste la puissance des actions métamorphiques pendant les premières périodes des dépôts sédimentaires.

DIVISION DES TERRAINS DE TRANSITION.

Les terrains de transition furent, dès le principe, divisés en trois groupes distincts, d'après l'ensemble de leurs caractères, leur ordre de superposition et la direction de leurs couches.

La position relative de ces trois groupes et leur composition générale sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Terrain de transition supérieur (*Système dévonien*).	Vieux grès rouge des Anglais. Anthracite de la Sarthe et des bords de la Loire.
Terrain de transition moyen (*Système silurien*).	Calcaire de Dudley; calcaire des environs de Brest. Ardoises d'Angers; quartzites de la Bretagne.
Terrain de transition inférieur (*Système cambrien*).	Calcaire compacte esquilleux. Schiste argileux du département de la Manche, grauwacke.

L'étude comparative des corps organisés fossiles, que recèlent les couches du terrain de transition, et des formations qui lui sont postérieures, a conduit à une classification nouvelle de ces terrains. En effet, une grande analogie existe entre la faune des terrains de transition et celle des systèmes carbonifère et permien qui se sont postérieurement déposés, tandis que cette analogie n'existe plus avec la faune du trias. Ces observations ont conduit les géologues à admettre que la surface du globe a été soumise à un ensemble de conditions offrant la plus grande similitude pendant le dépôt des formations dont nous venons de parler: dès lors on a proposé de désigner ces formations par le nom unique de terrains *paléozoïques*, dénomination qui rappelle l'analogie qui existe entre les faunes de leurs divers étages, et qui indique en outre que les espèces animales et végétales appartenant aux types les plus éloignés de ceux de l'époque actuelle se rencontrent dans ces anciens terrains.

La position relative des cinq groupes de terrains paléozoïques, leur composition générale, la direction des systèmes de montagnes qui sont arrivées au jour pendant cette longue période, sont représentées dans le tableau suivant :

5. Terrain permien....	*Système du Rhin.* — Direction N. 21° E. à S. 21° O. Grès des Vosges. *Système des Pays-Bas et du sud du pays de Galles.* — Direction E. 5° S. à O. 5° N. Zechstein (calcaire magnésien des Anglais). Grès rouge (rothe todte liegende).

4. Terrain carbonifère.	*Système du nord de l'Angleterre.* — Direction S. 5° E. à N. 5° O.
	Terrain houiller proprement dit.
	Système des Ballons (Vosges) et des collines du Bocage de la Normandie. — Direction E. 15° S. à O. 15° N.
	Calcaire carbonifère.
3. Terrain dévonien....	Vieux grès rouge des Anglais, terrain dévonien proprement dit.
	Anthracite de la Sarthe et des bords de la Loire.
2. Terrain silurien.....	*Système de Westmoreland et du Hundsrack.* — Direction au Binger-Loch E. 31° N. à O. 31° S.
	Tilestone.
	Roches de Ludlow.
	Calcaire de Wenlock et des environs de Brest.
	Grès du Caradoc; quartzites de la Bretagne.
	Dalles de Llandeilo.
1. Terrain cambrien...	*Système de Morbihan.* — Direction à Vannes O. 38° 15′ N. à E. 38° 15′ S.
	Calcaire de Bala
	Système de Longmynd. — Direction au Binger-Loch N. 31° 15′ E. à S. 31° 15′ O.
	Terrain des ardoises vertes du pays de Galles.
	Système du Finistère. — Direction à Brest O. 21° 45′ S. à E. 21° 45′ N.
	Terrain des schistes cambriens de la Bretagne.
	Système de la Vendée. — Direction N.N O. à S.S.E.
	Terrains des schistes verts satinés de Belle-Isle.

SYSTÈME SILURIEN.

On a donné à ce système le nom de système *silurien*, parce que c'est dans la partie de l'Angleterre et du pays de Galles, qui formait l'ancien royaume britannique des Silures, que les roches dont il se compose ont été surtout étudiées. Les roches siluriennes sont immédiatement superposées au système *cambrien*. On distingue les roches siluriennes inférieures, constituées par la *formation* de *Caradoc* et la *formation* de *Llandeilo*, et les roches siluriennes supérieures, constituées par la *formation* de *Ludlow* et la *formation* de *Wenlock*.

Formation de Ludlow. — Couche du système silurien d'une grande puissance. Les fossiles que l'on y rencontre sont les écailles, les mâchoires, les dents et les coprolithes de poissons particuliers, les plus anciens qu'on ait signalés, et pourtant d'une organisation très-complète. On y trouve aussi des coquilles des diverses espèces de *Leptæna*, d'*Orthis*, de *Terebratula*, d'*Avicula*, de *Trochus*, de *Bellerophon*, etc.; dans le calcaire inférieur, plusieurs espèces de *Trilobites* et une certaine espèce éteinte de *Crustacé* caractéristique de la période silurienne en général. Parmi les grès de cette formation, quelques-uns sont ondulés et donnent ainsi la preuve de leur précipitation lente. Il en est de même de *schistes argileux* à grains fins particuliers. Ces

schistes sont d'une grande puissance; par suite de leur tendance à se résoudre en boue, on les appelle *pierre de boue*. Ils renferment souvent des zoophytes dont la position droite indique évidemment qu'ils sont devenus fossiles aux lieux mêmes où ils ont vécu dans le fond de la mer. Les plus communs de ces *zoophytes* sont les *Graptolites*.

Formation de Wenlock. — La roche de Dudley, si riche en débris organiques, appartient à cette couche du système silurien supérieur; la partie supérieure consiste en calcaire plus ou moins cristallin, et fortement chargé de *Coraux* et d'*Encrinites*, appartenant à des espèces particulières. Sa partie inférieure se compose principalement de *schistes argileux*. Le corail en forme de chaîne y abonde.

Formation de Caradoc. — Cette formation a 762 mètres de puissance; elle consiste en grès de diverses couleurs, auxquels s'ajoutent quelques lits subordonnés de calcaire. Presque tous les fossiles les plus abondants de ce système de couches appartiennent aux mêmes genres que ceux signalés dans les couches siluriennes supérieures; seulement les espèces sont distinctes.

Formation de Llandeilo. — Cette division forme la base du système silurien; elle consiste en schistes durs, noirâtres, quelquefois micacés, souvent calcarifères, caractérisés surtout par de grands trilobites, *Asaphus buchii*, *A. tyrannus*, qu'ils renferment. Ce dépôt contient encore plusieurs genres de mollusques, et présente une particularité intéressante : à plusieurs formes éteintes de testacés particuliers aux roches siluriennes inférieures, tels que des *Orthoceras*, des *Pentamerus*, des *Spirifer* et des *Productus*, il se joint souvent d'autres espèces appartenant à des genres ayant des espèces encore vivantes, comme des *Nautilus*, des *Turbo*, des *Buccinum*, des *Terebratula*, etc.

Il n'existe aucune plante terrestre dans les strates qui appartiennent à la période silurienne.

Système silurien de la Bohême.

Le système silurien du centre de la Bohême présente une grande analogie avec celui de l'Angleterre. Ce terrain constitue au centre de la Bohême un bassin bien délimité dans ses contours; sa forme est celle d'une ellipse dont le grand axe, d'une longueur d'environ 133 kilomètres, est dirigé du nord-est vers le sud-est. Dans toute son étendue ce bassin repose sur le granite et les gneiss, qui en beaucoup de localités semblent alterner avec des roches métamorphiques et se fondre avec elles; voici, d'après M. Barraude, la composition générale de ce terrain :

	Étage A.	Micaschistes. Schistes amphiboliques.
	Étage B.	Grauwackes. Schistes argileux sans fossiles.
Système silurien inférieur..	Étage C.	Schistes argileux fossilifères.
	Étage D.	Quartzites et schistes feuilletés.
Système silurien supérieur.	Étage E.	Calcaire inférieur.
	Étage F.	Calcaire moyen.
	Étage G.	Calcaire supérieur.

La partie inférieure du terrain est composée de deux étages, savoir: l'étage A comprenant des roches cristallines (schistes amphiboliques, micaschistes) métamorphiques. Ces roches forment les contours extérieurs du bassin silurien en contact avec les granites et les gneiss, par lesquels elles semblent recouvertes en divers endroits.

L'étage B est formé de grauwackes tantôt à gros grains, tantôt à grains fins; ces grauwackes renferment un grand nombre de filons métallifères, de plomb et d'argent, exploités principalement dans les environs de Przibram. M. Barraude n'a trouvé aucune trace de fossiles dans ce terrain; il est porté à croire que ces deux étages A et B sont inférieurs au système silurien proprement dit, et doivent être placés dans la série des terrains qui constituent le système cambrien.

L'étage C est essentiellement composé de schistes argileux, peu riches en silice, et dont la structure est très-feuilletée; leur couleur varie du brun au bleu noir. Ces schistes à ginetz et à skrey renferment un grand nombre de trilobites. Cet étage correspond aux dalles de Llandeilo dans la série anglaise.

L'étage D est composé de roches siliceuses; sa base est formée par des schistes siliceux variant d'aspect et de couleur suivant les localités; au-dessus reposent des couches épaisses d'un conglomérat très-solide dont tous les éléments sont siliceux; au-dessus de ce conglomérat sont des grès très-durs à ciment siliceux d'un grain souvent très-fin, et qui rappellent le grès de May dans le département du Calvados, grès qui fait partie du système silurien de la Bretagne. Enfin au-dessus de ces quartzites, apparaissent des schistes feuilletés, noirs, alternant avec quelques bancs peu épais de grès siliceux.

Le système silurien supérieur de la Bohême est composé d'une masse presque continue de calcaire qui sont les trois étages E, F, G; ces calcaires forment un bassin à découvert, entouré sur tout son pourtour par la partie supérieure de l'étage D.

Terrain silurien de la Scandinavie et de la Russie.

Ce terrain se retrouve dans le Scandinavie. Ses couches sont horizontales comme à l'époque de leur dépôt: elles ont cependant, dans quelques localités, été métamorphisées par l'éruption de quelques roches. La *fig.* 2, *Pl. IV*, qui représente une coupe de la montagne de Kinnekulle en Suède, donne une idée de la composition de ce terrain.

La base de la montagne est formée de couches inclinées de gneiss; au-dessus commence un étage (A) de grès, passant à la grauwacke, renfermant des fucoïdes et d'autres empreintes de fossiles. Le grès à fucoïde (A) est recouvert par un étage B de schistes alumineux contenant des nodules calcaires; on trouve dans cet étage des *Trinucleus*, des *Paradoxydes* et des *Battus*. Ce système est recouvert par un étage de calcaires (C) rouges, dont la partie inférieure se rattache par des nuances insensibles aux schistes alumineux inférieurs. Ces calcaires renferment beaucoup de trilobites, et un nombre considérable d'orthocères.

La prédominance de ces fossiles dans l'étage C lui a fait donner le nom de *calcaire à Orthocères*.

Le calcaire à orthocères supporte une épaisse formation D de

schistes noirs, marneux, contenant quelques couches subordonnées de calcaires. On y rencontre un fossile singulier sur la détermination duquel règne encore la plus grande incertitude, désigné sous le nom de *Graptolites*.

Le sommet de la montagne est recouvert par une masse de roches basaltiques qui s'est fait jour au travers des couches fossilifères de la montagne. Tout cet ensemble de couches correspond au système silurien inférieur de l'Angleterre.

En Russie, le système silurien forme une bande considérable, qui part du golfe de Livonie, suit les contours du golfe de Finlande, passe à Saint-Pétersbourg et s'avance jusqu'à la mer Blanche dans la contrée de la Petschora; il forme ensuite une autre bande dans l'Oural. Dans la première bande, les couches du système silurien sont sensiblement horizontales, et ne présentent aucune trace de soulèvement ni de métamorphisme, tandis qu'au contraire dans la chaîne de l'Oural, les couches de ce terrain ont subi de violentes dislocations : elles sont plissées et souvent même renversées, et la texture des roches qui les composent a changé d'une manière complète; les calcaires deviennent durs, compactes et fortement colorés, et des schistes argileux et des grauwackes remplacent les argiles et les grès des couches de la première bande.

Système silurien de la Bretagne.

Dans la presqu'île de Bretagne on retrouve le système silurien. Les couches qui le composent se présentent dans un ordre constant; elles sont formées de poudingues et de grès quartzeux, de schiste bleu tégulaire, qui fournit les ardoises d'Angers, et enfin de calcaire compacte, renfermant des trilobites et des crinoïdes. Ce terrain repose à sa partie inférieure sur une formation schisteuse plus ancienne, que nous décrirons plus loin sous le nom de terrain *cambrien*.

Le terrain silurien de la Bretagne commence par un conglomérat, formant souvent un poudingue dont les galets sont très-considérables. Près de Cherbourg, sur la route de Saint-Lô à Vire, on voit la partie inférieure de ce terrain reposée sur les schistes cambriens en stratification discordante; il en résulte que les grès quartzeux de la montagne du Roule, près de Cherbourg, et les poudingues qui y sont associés, forment constamment les couches inférieures du terrain silurien. Presque partout ce grès est très-développé; il forme en général toutes les chaînes qui sillonnent de l'est à l'ouest la presqu'île de Bretagne. Cette disposition singulière qui peut faire croire, quand on n'y regarde pas de près, que le grès est toujours à la partie supérieure du système, tient à ce que les couches du terrain présentent des plis nombreux, et que les schistes, étant beaucoup moins résistants que les grès, ont été détruits en partie, tandis que les grès ont résisté.

La *fig*. 3, *Pl. IV*, rend évidente la disposition dont nous venons de parler; dans cette coupe représentant le plissement du terrain silurien entre Rennes et Nantes, on a

A. Granite, C. Schiste ardoisier,
B. Grès quartzite, D. Schiste maclifère.

Dans les environs de Caen, le terrain cambrien est recouvert par

le terrain silurien inférieur, dont les couches sont placées transversalement sur les tranches inclinées du schiste cambrien. Les premières assises de ce système commencent par un poudingue quartzeux composé de galets de quartz hyalin, reliés par un ciment de schiste argileux rougeâtre. Ce poudingue contient, en outre, des grains de feldspath blanchâtre ou rosâtre, et des fragments peu nombreux de schistes et de grauwackes. Quelques couches d'un grès quartzeux recouvrent immédiatement les poudingues; au-dessus on trouve un calcaire compacte gris clair qui forme des couches peu épaisses, alternant à plusieurs reprises avec le grès précédent. Ce calcaire, désigné sous le nom de *calcaire marbre*, ne contient aucun fossile. On exploite ce calcaire dans les contrées un peu à l'ouest de Caen.

L'étage du grès de May (Calvados) et des quartzites correspondantes de la Bretagne est recouvert par une série puissante de couches schisteuses. Tantôt les schistes contiennent des paillettes de mica et forment des grauwackes schisteuses, comme dans les environs de Rennes; tantôt ils sont à l'état de schiste argileux, bleuâtre, tégulaire, et fournissent des ardoises de qualité supérieure. C'est à cet étage et dans cette position qu'est placé le schiste ardoisier d'Angers, si célèbre par les nombreuses ardoises de première qualité qu'il produit.

Les schistes d'Angers sont immédiatement superposés à l'étage des grès et quartzites de May. L'épaisseur de ces schistes tégulaires est considérable; leur fissilité, quoique accidentelle, se reproduit sur une grande longueur.

L'étage des schistes ardoisiers est presque partout recouvert par du calcaire compacte noir, contenant souvent des trilobites et des crinoïdes. L'importance de la chaux, pour l'amendement des terres dans ce pays dont le sol est argileux, a fait rechercher cette roche avec beaucoup de soin; tous les gisements sont mis à profit, et sur chacun d'eux on a construit des fours à chaux qui, par leur ensemble, sont d'un haut intérêt pour le géologue. Constamment placés sur la lisière du terrain ardoisier, ces fours à chaux forment une ligne continue, parallèle à la stratification générale du terrain, et fournissant autant de points de repère qui guident dans l'étude du terrain silurien.

Les calcaires supérieurs au système ardoisier prennent souvent un grand développement, comme on peut l'observer dans les environs de Brest; dans cette dernière localité on trouve les fossiles habituels du calcaire de Wenlock et de Dudley; le calcaire de la rade de Brest est donc le représentant en Bretagne des couches de Wenlock de la série anglaise, et appartiennent alors au système silurien supérieur.

Terrain silurien de la Montagne-Noire.

Le système silurien peut être observé dans d'autres points de la France et notamment dans la Montagne-Noire. Le massif de cette chaîne, entre Castres et Carcassonne, depuis Sorrèze et le bassin de Saint-Féréol, jusque vers Saint-Gervais et le pont de Camarès, est formé de masses ellipsoïdales de granite, séparées par des bandes de roches schisteuses et calcaires qui appartiennent à un terrain paléozoïque. La coupe représentée par la *fig* 4, *Pl. IV*, et passant par

Sorrèze, donne une idée de la disposition des couches du terrain. On y représente :

1. Sorrèze,
2. Vallée du Sor,
3. Anciennes minières de fer,
4. Tour de Roquefort,
5. Les Campmazes,
A. Granite,
B. Schiste silurien,
C. Calcaire silurien,
D. Schiste violet avec fossiles.

Le granite, dans cette coupe, forme un massif considérable, sur les pentes duquel reposent les couches fortement redressées et plongeant en sens inverse du terrain paléozoïque; le schiste est entièrement cristallin au contact du granite, et le calcaire forme une assise beaucoup plus puissante que celle des schistes. Les belles carrières de marbre de Cannes, entre Carcassonne et Saint-Pons, sont ouvertes dans ce calcaire. Les couches les plus anciennes des carrières de Cannes sont composées d'une alternative réitérée de schiste vert, de schiste gris et de calcaire à cassure esquilleuse, contenant quelques crinoïdes. Les couches de calcaire sont très-minces, constamment mélangées de parties schisteuses et ne pouvant être exploitées. Le schiste est lui-même souvent calcaire, de sorte qu'il est évident que ces deux substances minérales se sont déposées en même temps. L'assise schisteuse est recouverte par une épaisseur considérable de calcaire présentant un grand nombre de variétés; quatre espèces principales fournissent des marbres différents. Elles constituent deux espèces de couches séparées; les unes composées de calcaire compacte, les autres de calcaire schisteux. Dans les carrières de la Bourcette, un peu au-dessus de l'ermitage de Notre-Dame-du-Cros, la première couche que l'on rencontre, au-dessus de l'assise schisteuse, est un calcaire compacte, esquilleux, gris clair, renfermant beaucoup de polypiers. Au milieu de cette série, on trouve un calcaire compacte, d'un jaune rosé, avec des parties un peu rouges; il contient une grande quantité de polypiers ramifiés, transformés en calcaires saccharoïdes très-clairs: ce qui donne à la roche un aspect très-agréable. Cette variété, désignée sous le nom de marbre *couleur de chair,* était fort en usage à une certaine époque. On retrouve ce marbre dans tous les monuments construits par Louis XIV et Louis XV.

Au milieu des couches qui fournissent le marbre couleur de chair, il existe accidentellement un calcaire contenant beaucoup de parties ferrugineuses, brunes, mélangées de calcaires feldspathiques concrétionnés. Cette variété de calcaire est désignée, dans le commerce, sous le nom de *marbre cervelas.* Au-dessus existe une série de couches présentant le passage à la partie schisteuse du terrain; elle se compose de couches puissantes de calcaire compacte, alternant avec des couches de schiste vert. Ce calcaire, qui fournit le marbre gris, est surtout caractérisé par la présence des crinoïdes. On y trouve aussi des orthocères et quelques individus des groniatites, si caractéristiques des couches suivantes.

La série calcaire est terminée par des couches de calcaire entrelacées de parties schisteuses, et qui fournissent le marbre griotte. La première couche, en remontant, est celle qui donne le plus beau marbre; elle a environ 40 pieds de puissance. Le schiste est d'un rouge sombre, tandis que le calcaire est d'un rouge vif mélangé de quelques parties blanches. Le calcaire forme constamment des amandes au milieu du schiste, et quand on étudie séparément chaque amande, on reconnaît que presque toutes portent des traces d'êtres organisés. Ce sont autant de groniatites qui ont été transformées en calcaire. Cette roche ayant éprouvé à la fois des pressions violentes et probablement aussi une altération dans sa texture, par voie de métamorphisme, les groniatites qu'elle contenait ont été comprimées et se sont, pour ainsi dire, fondues dans la pâte.

Le marbre griotte passe, par transition insensible, à du calcaire schisteux, mélangé tantôt de schiste rouge et donnant un marbre imparfait, tantôt de schiste vert et passant à un calcaire analogue au marbre de la vallée de Campan dans les Pyrénées.

L'étude des fossiles renfermés dans les couches dont nous venons de parler conduit à placer le terrain paléozoïque de la Montagne-Noire dans le système silurien; les marbres de Cannes appartiendraient principalement à la partie la plus supérieure du terrain silurien, à l'étage du tilestone fossilifère. On doit rapporter au même horizon géologique les couches paléozoïques de la vallée de Campan et celles de Schirmeck (Vosges).

DU SYSTÈME CUMBRIEN.

Le système cumbrien comprend la série des terrains qui se sont formés avant le terrain silurien, et dont le dépôt a été interrompu par le soulèvement désigné sous le nom de *système de Morbihan*. M. Élie de Beaumont range dans ce système d'abord les terrains des schistes verts satinés de Belle-Isle, puis le terrain des schistes cumbriens de la Bretagne, le terrain des ardoises vertes du pays de Galles, et enfin la série des couches renfermant le calcaire de Bala (pays de Galles).

Le calcaire de Bala manque dans la presqu'île de Bretagne; mais le terrain silurien y repose sur un système de couches schisteuses qui font partie du système cumbrien.

Les couches inférieures de ce système, partout en contact avec le granite, ont éprouvé des altérations qui en modifient les caractères. Elles sont ordinairement à l'état de schiste micacé ou de schiste talqueux; et quand cette formation n'est pas très-épaisse, ces roches constituent seules tout le terrain qui, en général, est fort homogène. L'extrémité nord du département de la Manche, aux environs de Cherbourg par exemple, montre clairement cette disposition. La rade de Cherbourg est creusée dans une dépression du terrain cumbrien et est défendue par deux avances de roches anciennes, sur lesquelles sont élevés les phares de Barfleur et du cap de la Hogue; le granite se fait encore jour près du port de Cherbourg, entre le fort Sainte-Anne et la haute mer; il y constitue des filons qui pénètrent dans le schiste cumbrien. Le terrain cumbrien de Cherbourg est donc resserré entre

deux promontoires de roches cristallines; aussi les caractères en sont-ils complétement altérés. Néanmoins on reconnaît qu'il se compose exclusivement de roches schisteuses. A mesure que l'on s'éloigne des granites de Cherbourg, le terrain cumbrien reprend les caractères qui lui sont propres; les environs de Saint-Lô en fournissent des coupes dans toutes les directions. Les plus intéressantes à étudier sont celles que l'on observe en se dirigeant de Saint-Lô vers le nord ou le sud, parce qu'elles coupent le terrain perpendiculairement à la direction des couches et le font connaître sur toute son épaisseur. Au nord on rencontre des schistes bleus qui alternent avec des grauwackes schisteuses, d'un gris jaunâtre. Ces grauwackes contiennent des veines de quartz noir, schisteux, disposées parallèlement aux feuillets et qui donnent à la roche une grande dureté. Elle est en outre souvent pénétrée de petits filons de quartz blanc, traversant à la fois les parties schisteuses et le quartz noir. Cet ensemble de couches, dans lequel le schiste bleu domine, se prolonge jusqu'aux environs de Lettry où le terrain cumbrien est recouvert indistinctement par le grès silurien et le grès houiller. Au milieu de ces schistes il existe, au Queney, des bancs de calcaire schisteux noir, très-cristallin, qui se prolongent sur une assez grande longueur; il est exploité à la Pegotterie. Ce calcaire schisteux diffère essentiellement des calcaires siluriens. Il est fort rare dans le système cumbrien de la Bretagne.

En se dirigeant de Saint-Lô vers le sud par la route de Vire, le terrain cumbrien se prolonge jusqu'à cette ville où il s'appuie sur le granite. Seulement, dans cet intervalle, on voit à plusieurs reprises le terrain silurien reposer sur les schistes cumbriens, coupe intéressante qui rend évidente la séparation entre les deux terrains. Cette formation de grauwackes et de schistes de la Bretagne avait été considérée comme représentant le système cambrien de la région cambrienne (pays de Galles); mais depuis on a constaté que les couches du pays de Galles représentent le système silurien inférieur; dès lors la dénomination de *terrain cambrien* a dû être abandonnée. M. de Beaumont a proposé alors de désigner sous le nom de *terrain cumbrien* cette formation, qui est un équivalent de roches anciennes des montagnes du Cumberland.

SYSTÈME DÉVONIEN.

Le soulèvement désigné sous le nom de *système du Westmoreland* et du *Hundsruck* a mis fin au dépôt du système silurien, qui a été suivi par celui des couches du système dévonien.

Système dévonien en Angleterre.

Ce système peut être étudié dans le Devonshire et la presqu'île de Cornouailles; les roches qui le composent sont percées en plusieurs points par des masses granitiques qui ont peu dérangé la stratification générale du pays; seulement, dans le voisinage du granite, les roches dévoniennes sont devenues plus cristallines. Vers la pointe de Cornouailles, au contraire, le métamorphisme du système est beaucoup plus général. Ce terrain, dans le Devonshire, est formé d'un ensemble de couches très-contournées de grès, de grauwackes, sou-

vent schisteuses, et des schistes; les schistes, dans le midi du comté, sont souvent ardoisiers; des couches de calcaires alternent avec les grès; la partie supérieure du terrain est composée d'une série alternative de schistes et de calcaires contenant des couches charbonneuses. Cette partie du système dévonien a été désignée sous le nom de *système carbonacé.* Le charbon qu'elle renferme est une espèce d'anthracite, de houille très-maigre, qui se brise en petits fragments avec la plus grande facilité. On trouve, dans les couches de ce terrain, les fossiles particuliers au système dévonien.

Dans le nord de l'Écosse, le vieux grès rouge forme un terrain bien défini composé de trois assises de roches. L'assise inférieure, qui repose sur un système de gneiss et de micaschistes, commence par un poudingue rougeâtre, grossier, à galets de quartzites. Le poudingue supporte un système de schistes alternant avec des calcaires; la découverte de nombreux poissons dans ces schistes les a rendus célèbres. L'assise supérieure est formée par une puissante masse de grès schisteux rouges.

Terrain dévonien de la Bretagne.

Ce terrain a de grands rapports avec le système des couches carbonacées du Devonshire; il est essentiellement formé de poudingues, d'anthracite et de schistes associés avec des calcaires; on le désigne sous le nom de *terrain anthraxifère* des bords de la Loire.

Ce terrain constitue une bande très-allongée, depuis les environs de Doné jusqu'à Niort; il forme, en outre, plusieurs lambeaux dans les départements de la Mayenne et de la Sarthe. Partout où il existe, il est supérieur au système silurien, comme on peut le constater en une foule de points des bords de la Loire, depuis Angers jusqu'à Nantes. Il commence par un poudingue composé de quartz hyalin laiteux, de quartz noir, de schiste micacé, et d'un schiste verdâtre qui se retrouve dans beaucoup de points de la Bretagne. Ce poudingue passe, par la diminution dans la grosseur des galets, à des grès avec lesquels il alterne à plusieurs reprises. On observe l'alternance réitérée de ces différentes couches, sur presque toute la longueur de la bande anthraxifère des bords de la Loire, particulièrement à la mine de Montjean et à celle de la Hayelongue. Des grès noirs schisteux, très-micacés et contenant des empreintes végétales, succèdent immédiatement aux poudingues.

Les grès sont recouverts par le système des couches à anthracites.

La disposition relative des couches d'anthracite et de grès a fait découvrir que ce terrain a été plusieurs fois contourné et replié sur lui-même.

Le système des couches contenant l'anthracite, est composé de schistes argileux, d'argiles schisteuses, de grauwackes, et souvent à la base de couches calcaires. Le charbon que renferme ce terrain est brillant, très-sec, ne colle pas en brûlant, et ne peut être transformé en coke; il se divise en petits fragments.

Au contact des couches de charbon, on trouve toujours au toit et au mur une roche nommée *pierre carrée*, à cause de la forme rhomboïdale que prennent les fragments quand on les casse. Cette roche,

parfaitement homogène, à cassure esquilleuse, offre la plus grande analogie avec un pétrosilex; mais comme on y a trouvé, à Chalonnes, des empreintes végétales, son origine n'est plus douteuse; c'est une roche sédimentaire altérée par des circonstances semblables à celles qui ont souvent modifié la texture des terrains paléozoïques.

Le terrain dévonien forme, dans la Mayenne et la Sarthe, une seconde bande, parallèle à celle des bords de la Loire. Dans les environs de Laval, on y observe cinq assises : d'abord un poudingue grossier, composé de galets de quartz, de schiste et de quartzites, reposant sur le système silurien; l'assise suivante est formée par des schistes noirs charbonneux, renfermant des couches de combustibles exploitées. Au-dessus règne une assise de calcaire compacte, d'un gris foncé, renfermant des fossiles dévoniens; ce calcaire supporte des schistes avec anthracite; un second calcaire, superposé aux couches anthraxifères, constitue la cinquième et dernière assise du terrain.

Terrain dévonien de l'Ardenne.

Dans l'Ardenne, le terrain dévonien repose sur un système de roches anciennes (terrain ardoisier), dont les unes appartiennent au terrain silurien, et quelques-unes à des terrains plus anciens.

On peut y distinguer trois étages :

3. Étage supérieur (psammite de Coudros);
2. Étage moyen (calcaire de Givet);
1. Étage inférieur (poudingue de Burnot).

L'étage inférieur est composé d'un système de roches quartzeuses et schisteuses rouges, et à la base desquelles on rencontre souvent un poudingue très-développé, entre Dinan et Namur. Ce poudingue est formé de galets de quartz blanc, de quartzites réunis par un ciment souvent très-siliceux : dans ce cas le poudingue est fort dur; quand le ciment est argileux, la roche se désagrége facilement. Le poudingue de Burnot représente le poudingue enfermé du système anthraxifère de la Bretagne, près de Givet et de Fumay, et à Pepinster, près de Spa; il repose en stratification sur les roches du terrain ardoisier.

L'étage moyen repose immédiatement sur l'étage inférieur, avec lequel il se lie par des couches schisteuses, à noyaux calcaires, et dans lesquelles le calcaire domine de plus en plus, jusqu'à ce qu'il se substitue entièrement au schiste. Le calcaire qui forme de beaux escarpements à Givet, renferme beaucoup de fossiles et un grand nombre de polypiers.

L'étage supérieur est principalement composé d'un grès micacé jaunâtre, quelquefois aussi grisâtre, bleuâtre et rougeâtre, que l'on peut observer sur la plupart des plateaux de Coudros. Ces psammites passent, dans leur partie inférieure, à un système de schistes gris peu altérables, qui donnent un aspect particulier à la contrée dont ils forment le sol; les pentes sont ravinées, lavées par les eaux et privées de terre végétale. Cette contrée s'appelle *Famenne* ou *Fagne*, en langue wallone, c'est-à-dire pays stérile et marécageux. Le schiste de Famenne rencontre, à sa base, des amas lenticulaires de calcaire, exploités comme marbres; tels sont les marbres rouges et gris, gris et blancs, de plusieurs carrières d'entre la Sambre et la Meuse.

Terrain dévonien de la Russie.

Ce terrain forme, dans les plaines de la Russie, depuis la Courlande jusqu'à la mer Blanche, un vaste bassin recouvert par les systèmes carbonifère et permien ; il est composé de couches horizontales de sables, de grès rouges, renfermant un grand nombre de poissons, puis d'argiles, de marnes et de calcaires blanchâtres, contenant beaucoup de fossiles communs aux couches du Devonshire et au calcaire de Givet. Mais dans la chaîne de l'Oural les couches du terrain dévonien sont bouleversées, et les roches ont pris une texture cristalline et schisteuse.

DU SYSTÈME CARBONIFÈRE.

Le système carbonifère est divisé en trois étages nettement prononcés en Angleterre, savoir :

3. Terrain houiller ;
2. Milstone grit ;
1. Calcaire carbonifère.

Ces étages ne se trouvent pas toujours tous les trois dans d'autres contrées.

Le calcaire carbonifère forme les montagnes du Derbyshire ; il est en général gris, noir ou blanchâtre ; il alterne souvent avec des argiles schisteuses. On y rencontre un grand nombre de fossiles, principalement des crinoïdes, des productus, des spirifer, etc. Le groupe des productus a atteint son maximum de développement dans ce terrain. La *fig.* 5, *Pl. IV*, représente une coupe prise aux environs de Bristol ; elle peut donner une idée de la composition du terrain :

A. Couches d'old-red-sandstone ;
B. Argile schisteuse verdâtre ou noirâtre ;
C. Calcaire d'une épaisseur de 500 à 700 mètres, formant les escarpements des bords de l'Évon ; il renferme des couches subordonnées d'un calcaire noir pétri de tiges d'encrines ;
D. Argile schisteuse, alternant avec des calcaires souvent oolithiques ;
E. Couches de milstone grit.

Dans le Derbyshire, le calcaire carbonifère a une épaisseur de 300 mètres ; les couches qui le composent présentent la particularité d'alterner avec des couches trapéennes qui se sont épanchées entre les bancs du calcaire ; ces roches éruptives sont appelées, dans le pays, *todstone*. Ce terrain renferme de nombreux filons métalliques ; de là le nom de *metalliferons limestone* qu'on donne quelquefois au calcaire carbonifère.

Le calcaire carbonifère occupe de grands espaces, depuis le Lancashire jusqu'à la partie septentrionale de l'Angleterre ; complétement calcaire au sud du Lancashire, le terrain devient entièrement arénacé dans le nord, et il présente toutes les apparences d'un terrain houiller, car on y exploite des couches de houille.

Au nord de la Tyne, le terrain a 300 mètres d'épaisseur ; il se compose de cinq couches calcaires, alternant avec des grès et des argiles

schisteuses, et renferme trois couches exploitées de houille de très-bonne qualité.

Au point de vue industriel, ce terrain est un terrain carbonifère bien supérieur à un terrain houiller proprement dit, bien qu'il soit géologiquement séparé du terrain houiller par tout l'étage du milstone grit.

Le milstone grit, second étage du système carbonifère, est représenté en Angleterre par un psammite, passant au grès, à l'akose et au poudingue. Ce terrain renferme quelques couches de houille dans l'Yorkshire et le comté de Devon.

Calcaire carbonifère de la Belgique.

Le calcaire carbonifère de la Belgique forme une série de plis parallèles à ceux du terrain houiller. Il est composé d'un calcaire compacte, très-dur, presque toujours coloré en bleu et quelquefois blanc. Ce calcaire fournit d'excellentes pierres de taille; on l'exploite aussi comme marbre dans les environs de Mons; le marbre qu'il fournit présente une pâte noirâtre, parsemée de points blancs, durs à des fragments d'encrines transformées en calcaire spathique. Dans sa partie inférieure, il alterne souvent avec des schistes gris, et est traversé par des filons contenant de la galène et de la calamine. On trouve de nombreux fossiles dans les couches de ce calcaire; les productus principalement abondent dans ce terrain.

On trouve quelquefois, au-dessus du calcaire carbonifère de Visé, un système de couches composé tantôt de quartzites, tantôt de schistes alunifères exploités pour la fabrication de l'alun.

Calcaire carbonifère de la France.

Un lambeau de ce terrain existe dans le bas Boulonnais; il est formé d'un calcaire d'une couleur gris clair, associé souvent à des schistes bitumineux et des veines dolomitiques; ce calcaire exploité dans les carrières de la vallée Heureuse, à l'est de Marquise, dans les carrières du Haut-Blanc et dans celles de Luvelle, exhale, quand on le casse, une odeur fétide; il renferme des productus et les fossiles habituels du calcaire de Visé. Ce calcaire supporte un système de couches d'argiles schisteuses, plus ou moins micacées, et de grès qui renferment des couches de houille; à Hardinghen les couches de houille connues sont au nombre de cinq.

Les argiles houillères sont recouvertes par un nouvel étage de calcaire, exploité comme marbre dans la carrière Napoléon à l'ouest de Ferques. Ce calcaire supérieur appartient aussi à l'époque du calcaire carbonifère. Ce terrain formé de deux étages calcaires, renfermant dans leur intervalle un système de couches de grès et d'argiles avec de la houille, corrsepond au calcaire carbonifère, riche en houille, du nord de l'Angleterre.

Le terrain anthraxifère des bords de la Loire est recouvert par un calcaire dont les couches sont parallèles à celles du terrain inférieur et qui prend parfois un grand développement, par exemple dans les environs de Sablé et de Chemeré où il forme la partie supérieure du terrain.

Le calcaire carbonifère de Sablé se lie, par sa stratification, avec le système anthraxifère sur lequel il repose. Or, comme les terrains houillers de Saint-Pierre-Lacour, de Littry et de Quimper, reposent en stratification discordante sur les tranchées inclinées des couches du terrain anthraxifère, il en résulte que le redressement des couches de Sablé est postérieur au dépôt de ces couches, mais antérieur à celui du terrain houiller proprement dit. Cette observation a conduit M. Elie de Beaumont à placer le soulèvement désigné sous le nom de *système des ballons et des collines du bocage de la Normandie*, entre le calcaire carbonifère et le terrain houiller proprement dit.

Calcaire carbonifère de la Russie.

Ce terrain forme en Russie une bande continue, qui part des environs d'Archangel, longe le lac Onéga, passe près de Saint-Pétersbourg et se développe autour de Moscou; il forme une seconde bande mince dans la chaîne de l'Oural. Le calcaire carbonifère de ces deux bandes constitue un terrain unique, continu, qui est recouvert, dans les plaines de la Russie par le système permien et des dépôts plus modernes. Ce calcaire est d'un gris blanc; quelques couches, celles de Vétegra, sur le bord du lac Onéga, sont tellement friables, qu'on les emploie à la fabrication d'un blanc d'Espagne comparable à celui qu'on produit avec la craie blanche des carrières de Meudon. Dans les environs de Moscou, le calcaire carbonifère peut être subdivisé en trois étages. L'étage inférieur, caractérisé par le *Productus gigas*, l'étage moyen où abonde le *Spirifer mosquensis*, et un étage supérieur dans lequel on trouve une quantité prodigieuse d'un petit fossile appelé *Fusuline*.

Sur les bords du Donetz, le calcaire carbonifère forme un bassin particulier, différent par les caractères du calcaire des deux bandes décrites plus haut. Ce calcaire n'est plus blanc, mais il est d'un noir verdâtre, et il renferme un grand nombre de couches de combustibles connues depuis Pierre le Grand. Les richesses houillères accumulées dans ce bassin sont immenses; le terrain doit être assimilé au calcaire carbonifère du nord de l'Angleterre.

TERRAIN HOUILLER.

Le terrain houiller proprement dit forme l'assise la plus élevée du système carbonifère; il est donc placé à la partie supérieure du terrain paléozoïque, qui se termine par le système permien.

D'après cette position constante du terrain houiller, qui n'admet aucune exception, on ne doit rechercher ce terrain que sur la limite des formations paléozoïques, mais il n'y forme pas une bande continue, on le voit seulement affleurer de distance en distance.

Près de Valenciennes, il est vrai, le terrain houiller se trouve placé immédiatement au-dessous du terrain crétacé; mais il y est lié à l'existence du terrain dévonien et du calcaire carbonifère de la Belgique qui affleurent de tous côtés et qui se prolongent jusqu'aux portes de Valenciennes. Cette circonstance est accidentelle: elle tient à ce que le terrain crétacé s'avance plus loin sur les formations paléozoïques que les calcaires du Jura, qui forment un intermédiaire habituel entre

la craie et le terrain houiller. Mais ces calcaires ont été pour ainsi dire dépassés par la craie; s'ils manquent près de Valenciennes, c'est une exception locale; ils n'en existent pas moins dans le bassin de Paris. La carte géologique de la France montre, en effet, que les calcaires du Jura émargent partout au-dessous du terrain crétacé inférieur et qu'ils forment une ceinture générale autour de Paris. De sorte que si, par hasard, le terrain houiller existe sous le sol du bassin de Paris, il faudrait traverser les formations crétacées et jurassiques pour l'atteindre.

Répartition du terrain houiller sur la surface de la France.

La répartition des bassins houillers sur la surface de la France est intimement liée avec l'existence des cinq groupes de montagnes qui constituent : 1° le plateau granitique central de la France; 2° le sol ondulé de la presqu'île de Bretagne; 3° celui des Ardennes; 4° le noyau de la chaîne des Vosges; 5° celui des montagnes des Maures sur le littoral du département du Var, et certaines parties des Pyrénées. Cet aperçu montre combien la richesse houillère est irrégulièrement distribuée sur le territoire français, où les terrains secondaires et tertiaires occupent une si vaste surface. L'absence presque complète de houille sur les pentes des Pyrénées et des Alpes et le petit nombre d'exploitations qui se rattachent au système de la Bretagne et des Vosges rend encore plus irrégulière chez nous la répartition de ce puissant mobile de l'industrie.

La plupart des bassins houillers sont groupés autour des montagnes anciennes du centre de la France; ils se trouvent renfermés dans une espèce de triangle irrégulier, dont la base ferait face à l'est, et s'étendrait d'Alais à Autun, et dont le sommet serait placé au point de jonction des départements du Lot, du Cantal et de la Corrèze. Les gisements qui sont dans le voisinage de la base de ce triangle, tels que ceux du Creusot (Saône-et-Loire), de Saint-Etienne et de Rive-de-Gier (Loire), d'Alais et de Saint-Ambroise (Gard) sont considérables; ils ont l'avantage d'être placés près de canaux, de fleuves ou de rivières navigables, qui leur permettent de répandre leurs richesses à de grandes distances. Mais presque tous les autres gisements de l'intérieur de la France dispersés dans des pays montueux et d'un accès difficile, ne peuvent écouler leurs produits à raison du prix des transports. Sans les mines de Valenciennes qui se rattachent à celles de la Belgique, et au système de montagnes des Ardennes, le nord de la France serait entièrement privé de houille. Mais ce gisement considérable offre de grandes ressources, et il a produit dans cette partie de la France, une agglomération industrielle comparable à ce qui existe sur les riches terrains houillers de l'Angleterre.

Répartition du terrain houiller en Angleterre.

L'Angleterre, si favorisée par l'abondance de ses gisements houillers qui occupent une superficie six fois plus considérable que la surface des terrains houillers en France, l'est également sous le rapport de leur répartition. En effet, le grand bassin houiller, situé au

sud de l'Ecosse, qui occupe une grande partie de l'espace compris entre Edimbourg, Glascow et Dumborton, aboutit aux deux mers. Ceux de Newcastle et de Durham touchent à la mer du Nord. Le littoral de l'ouest offre les gisements de Whitehaven, dans le Cumberland, de Liverpool, de Chester, de l'île d'Anglesea et ceux d'Haverford et de Merthyr-Tydvil dans le pays de Galles. Enfin les bassins houillers situés au centre de l'Angleterre, tels que ceux de Derby, de Sheffield, de Birmingham et de Dudley, sont traversés par des canaux qui leur permettent d'exporter leurs produits jusqu'à Londres.

Comparaison entre les terrains houillers de la France et des autres pays.

L'Angleterre, la France et la Belgique sont des diverses contrées de l'Europe les plus favorisées sous le rapport de la richesse houillère.

La Belgique renferme des terrains houillers dont la superficie s'élève à $\frac{1}{24}$ de la surface totale du pays ; la proportion de ce terrain est de $\frac{1}{20}$ en Angleterre et de $\frac{1}{200}$ en France.

L'Italie, la Grèce et la Turquie d'Europe paraissent jusqu'à présent très-pauvres en terrains houillers.

Des amas considérables de houilles se trouvent vers les frontières septentrionales du Portugal et de l'Espagne.

Le Danemarck, la Norvége et la Suède ne présentent pas de terrains houillers proprement dits. La Russie n'en possède que quelques lambeaux clair-semés et d'une exploitation jusqu'ici peu profitable; le vaste bassin de Donetz, si riche en houille, n'appartient pas au terrain houiller, mais au calcaire carbonifère.

Le Wurtemberg, la Bavière, l'Autriche, la Hongrie, la Moravie, la Styrie et l'Illyrie ne possèdent que de très-faibles dépôts houillers.

Les mines de houille de la Bohême commencent à prendre une grande importance. La Prusse est parmi tous les États de l'Allemagne le plus riche en dépôts houillers.

Relief du terrain houiller en France.

Le terrain houiller ne recouvrant pas en France de très-grandes surfaces, n'imprime pas au sol des caractères particuliers ; néanmoins son relief présente en général une multitude de collines dont il est difficile de saisir l'ensemble. En ce qui concerne les bassins de Saint-Etienne, de l'Aveyron, d'Autun et du Creusot, les collines s'y succèdent sans ordre, et de petits vallons assez évasés les découpent dans tous les sens.

Les nombreux traits de ressemblance qui existent entre la plupart des terrains houillers de la France, conduisent à admettre qu'à l'époque de leur dépôt il a dû régner une grande uniformité dans le régime des eaux où se sont déposés ces terrains. Ils se composent en général d'une assise considérable de grès houiller, surmontée d'une grande épaisseur d'argile schisteuse. Leur position présente également une identité presque complète, et si l'on pouvait enlever les terrains secondaires qui les recouvrent en quelques points, on remarquerait bientôt qu'ils occupent des cavités plus ou moins profondes, disséminées d'une manière irrégulière sur la surface du terrain ancien. Ces différents bassins, isolés les uns des autres, ne présentent

aucune continuité : on voit que ce sont des dépressions du sol ancien, qui ont dû être envahies par les marécages, et dont chacune est devenue un terrain houiller.

Classification des terrains houillers.

Les terrains houillers doivent être séparés en deux classes, d'après les conditions essentiellement différentes de leurs dépôts, qui se sont formés à la même époque géologique.

Les uns, formés dans des bassins circonscrits, sont des dépôts lacustres plus ou moins analogues aux tourbières.

La base de ces dépôts circonscrits est presque toujours occupée par un poudingue grossier, fait aux dépens des roches environnantes. Souvent ces poudingues sont formés de la réunion de blocs gigantesques, assez peu roulés, et qui n'ont pu être transportés de très-loin. Les terrains houillers de l'Aveyron, de Saint-Etienne et d'Epinée offrent de beaux exemples de ces poudingues à grandes parties, et les blocs de roches anciennes qui y forment des galets ont fréquemment un volume de plusieurs mètres cubes. Ces poudingues à grandes parties sont en général formés de débris de roches anciennes qui entrent dans la constitution géologique de la contrée où on les observe, circonstance qui montre que les terrains houillers sont le résultat de causes locales.

Le second groupe comprend les terrains houillers déposés dans de vastes bras de mer ; ils portent tous les caractères des terrains déposés dans les mers, et participent à leur étendue et à leur puissance. Cette seconde classe de terrains houillers, déposés le long des falaises des terrains paléozoïques plus anciens, se présente plutôt par bandes que par bassins fermés de tous côtés. Les poudingues qu'on observe à la partie inférieure de ces terrains diffèrent, par des caractères très-importants, de ceux qui occupent la base des terrains houillers lacustres. Ces poudingues, rarement composés de galets de plus d'un décimètre de diamètre, sont presque uniquement siliceux ; les roches du pays n'y sont que faiblement représentées, et dans tous les cas elles y sont accompagnées par de nombreux galets de quartz hyalin laiteux. Cette différence dans la nature des galets, qui donne la preuve que les terrains houillers à poudingue quartzeux n'ont pas été formés, comme ceux à poudingue granitique ou schisteux, par des causes locales, se rattache toujours à la présence de couches plus ou moins puissantes de milstone grit, ou de calcaire marin (calcaire carbonifère) qui se montrent à la base de cette seconde classe de dépôts houillers.

Les terrains houillers de l'intérieur de la France sont éminemment formés dans des bassins circonscrits ; ils contrastent avec les couches houillères du nord de la France, de la Belgique et de l'Angleterre. Dans l'Ardenne, aux montagnes du pays de Galles et de l'Ecosse s'étendaient à cette époque des bras de mers, dans lesquels se sont formés les dépôts du calcaire carbonifère, du milstone grit, et après eux celui du terrain houiller.

Composition des terrains houillers.

La formation houillère est remarquable par l'aspect des matériaux

qui la composent. Ce sont des poudingues, des grès plus ou moins fins, des grès schisteux, des argiles schisteuses, de la houille, des schistes bitumineux, des minerais de fer, et dans quelques cas des calcaires.

Des grès. — Le grès houiller est formé par les éléments quartzeux et feldspathiques des roches anciennes, réduits par la trituration à l'état de grains de sable, et agglutinés par un ciment argileux; il présente de nombreuses variétés dans la grosseur des grains; souvent il est schisteux et micacé; il passe dans sa partie inférieure à des poudingues et à des conglomérats à gros fragments. Les poudingues sont évidemment le résultat de l'action des eaux sur les roches anciennes qui entrent dans la constitution géologique de la contrée. Les granites, les gneiss, les micaschistes ont fourni les éléments de ces poudingues : quelquefois des poudingues alternent avec les couches du grès houiller; dans ce cas les galets qui les composent sont d'un petit volume.

Des argiles. — Les argiles schisteuses sont les parties décomposées des roches qui constituent les grès, dont les éléments, assez fins pour s'être maintenus en suspension, ne se sont déposés que quand la tranquillité des eaux l'a permis. L'argile est plus ou moins feuilletée, et renferme souvent des paillettes de mica. Elle est toujours colorée par du charbon, disséminé d'une manière homogène qui donne à la masse une teinte grise ou noirâtre particulière; de nombreuses empreintes végétales se rencontrent dans les argiles du terrain houiller.

Des minerais de fer. — Le terrain houiller contient des minerais de fer, tantôt en rognons, tantôt en couches peu épaisses; le minerai en couche, moins riche que l'autre, est presque toujours de qualité inférieure. Les rognons de fer carbonaté sont disséminés dans les argiles schisteuses suivant des directions parallèles aux couches des schistes; souvent ils sont tellement adhérents à la roche, qu'il est difficile de les discerner : mais ils deviennent visibles par l'exposition à l'air qui délite le schiste et les met à nu.

Du calcaire. — Quelques couches de calcaires, subordonnés aux argiles schisteuses, se rencontrent à la partie supérieure de quelques terrains houillers de l'Angleterre, et en France dans celui d'Autun; ces couches sont généralement fort minces.

De la houille. — La houille se présente en couches très-variables dans leur épaiseur et leur continuité; elles sont intercalées indistinctement dans les strates des argiles schisteuses et des grès houillers, dont elles suivent toutes les allures. Les deux surfaces qui comprennent une couche de houille, sont désignées sous le nom de *toit* et de *mur*. Le nombre des couches de houille, ainsi que leur puissance et leur continuité, est très-variable dans les divers bassins houillers. On remarque cependant que les couches minces et régulières sont assez ordinairement continues et multipliées; ainsi dans le bassin de Mons il y a un nombre considérable de couches de houille, dont la puissance varie de $0^m,20$ à $1^m,50$, tandis que les couches puissantes sont limitées dans leur étendue et que rarement il y en a plus de trois ou de quatre superposées dans le même bassin. Ainsi dans le bassin de Saône-et-Loire, au Creusot, on exploite une couche dont la puis-

sance moyenne est de 12 mètres, et qui atteint du toit au mur jusqu'à 40 mètres dans les renflements.

Description du terrain houiller de la Haute-Loire.

De tous les bassins houillers circonscrits du centre de la France, le plus important est celui de la Haute-Loire, par son étendue, sa position et l'excellence du charbon qu'il produit; cette raison a déterminé à en donner une description précise, qui servira à faire connaître avec détails un terrain houiller dans tout son ensemble.

La *fig.* 6, *Pl. V*, montre la disposition générale de ce bassin.

Le bassin occupe une vaste dépression que présente le terrain de gneiss et de micaschistes du plateau central de la France. Au sud s'élève le mont Pilat; au nord la chaîne parallèle de Riverie et de Fontanès; à l'ouest le plateau granitique des bords de la Loire, base des montagnes du Forez. Entouré de ces hauteurs, le bassin houiller s'étend du nord-est au sud-ouest, depuis les bords du Rhône jusqu'aux rives de la Loire. D'abord fort étroit, à son extrémité limite sud-ouest, il se renfle bientôt vers le nord, atteint sa plus grande largeur vers Roche-la-Molière et Saint-Etienne, se rétrécit de nouveau insensiblement au delà de Saint-Chamond et devient surtout très-peu large en aval de Rive-de-Gier. Ainsi à Tartaras, la bande houillère est réduite à moins de 300 mètres, et depuis ce point elle longe la rive gauche du Gier jusqu'au Rhône, toujours étroite comme à Tartaras, et même parfois divisée en deux par une série d'îlots granitiques.

Le terrain houiller de la Loire est partagé en deux parties par la ligne de faîte qui établit un point de partage entre les eaux de la Loire et celles du Rhône. Cette division naturelle a, de tout temps, fait regarder le terrain de la Loire comme composé de deux bassins distincts, celui de Saint-Etienne et celui de Rive-de-Gier. Avant l'établissement du chemin de fer de Saint-Etienne à Lyon, cette différence dans le relief du sol avait puissamment influé sur les débouchés des mines, groupées autour de ces deux villes; en effet, le sol s'élève progressivement depuis Givors jusqu'à un peu au delà de Saint-Chamond, et pour passer de la vallée du Gier dans celle du Furens où est situé Saint-Etienne, il faut traverser une petite chaîne de collines qui apporte une difficulté au transport; il en résulte que les mines de Saint-Etienne exportaient leurs produits à l'ouest par la vallée de la Loire, tandis que celles de Rive-de-Gier alimentaient exclusivement Lyon et le littoral de la Saône et du Rhône. Toutefois, l'établissement du chemin de fer a, pour ainsi dire, effacé la limite entre les deux bassins dont se compose le terrain houiller de la Loire. Ainsi donc cette subdivision du terrain houiller de la Loire en deux bassins ne doit plus être maintenue aujourd'hui; en effet, après une étude approfondie du pays, M. Gruner, ingénieur en chef des mines, a été conduit à reconnaître que le bassin de Rive-de-Gier n'est qu'une fraction de celui de Saint-Etienne, qu'il est placé à la base de tout le terrain; à Saint-Etienne même, il a retrouvé les traces des couches de Rive-de-Gier; la description et les coupes qui suivent sont empruntées au travail de cet ingénieur.

Composition du terrain houiller de la Haute-Loire.

Les roches qui constituent le terrain houiller sont les suivantes :

1°. Des poudingues formés de gros fragments de schistes micacés, de schistes talqueux et de granites à peine liés entre eux ;

2°. Des poudingues formés de fragments moins gros liés par la pâte ordinaire du grès houiller ; ils sont plus répandus que les précédents, mais ils sont encore loin de former la roche dominante du terrain houiller de la Loire ;

3°. Des grès à gros grains mélangés de petits fragments de diverses roches primitives ;

4°. Des grès à grains de grosseur uniforme mélangés de paillettes de mica et fortement agrégés ; ils forment des bancs d'une grande épaisseur exploités comme pierre de taille ; ils recouvrent immédiatement les poudingues ; mais ces dernières roches manquent dans une grande étendue du bassin ; le grès repose alors directement sur le terrain ancien ;

5°. Des grès à grains moins gros et déposés en couches minces ;

6°. Des grès micacés dont le grain est très-fin et les feuillets très-minces ;

7°. Des schistes argileux micacés d'un tissu lâche et dans lesquels on distingue de petits grains de sable ;

8°. Des schistes d'un tissu plus serré dans lesquels le mica est encore visible ;

9°. Des schistes d'un tissu très-serré ; cette roche est la plus commune.

Les grès forment la masse du terrain houiller ; ils alternent avec les couches de houille ; souvent ils sont en contact avec elles, ou ils n'en sont séparés que par des lits très-minces de schistes bitumineux avec des empreintes végétales. Les poudingues à gros fragments n'accompagnent jamais immédiatement la houille ; ils composent, quand ils existent, les premières assises du terrain, et ils reposent directement sur les roches primitives.

Division du terrain houiller de la Loire.

L'étude du bassin de la Loire a conduit M. Gruner à y découvrir une succession de couches qui se rangent en quatre séries, se succédant de bas en haut dans l'ordre suivant :

1. A la base, le groupe appelé *système des couches de Rive-de-Gier*, parce qu'il comprend toutes celles du bassin de Rive-de-Gier, et qu'il est mieux connu et plus riche en houille dans cette partie du terrain que dans le reste du bassin ;
2. *Le système inférieur de Saint-Étienne* comprend les diverses couches connues à Chamond, et de plus celles que l'on exploite dans la partie nord et ouest du bassin proprement dit de Saint-Étienne ;
3. *Le système moyen* ou *de Bérard*, au centre du bassin de Saint-Étienne ;
4. Enfin *le système supérieur* ou *du bois d'Avèze*, ainsi appelé parce qu'il clôt la période houillère et se présente plus particulièrement développé sous la colline du bois d'Avèze.

Dans la *fig.* 6 et dans les coupes qui suivent, le système 1 est représenté par des points; le système 3 par des hachures; le système 4 par des hachures croisées; enfin le système 2 se distingue par l'absence de notation particulière.

1°. Système de Rive-de-Gier.

Ce système se divise en trois étages, savoir :

A. La brèche de la base marquée par des gros points sur la carte et les coupes;

B. L'étage houiller proprement dit;

C. Le conglomérat stérile dans le haut du terrain (figurés ensemble par une ponctuation fine).

Les coupes *fig.* 7 et 8, *Pl. IV*, 9, 10 et 11, *Pl. V*, indiquent la disposition de ces trois parties.

A. La brèche est un amas confus de fragments anguleux de granite, de gneiss et de micaschistes réunis par les parties finement broyées des mêmes roches. Les blocs sont de grosseur très-inégale, variant depuis le volume du poing jusqu'à plus d'un mètre cube. La brèche est principalement développée près de Saint-Chamond et forme une bande continue depuis Rive-de-Gier jusqu'à la Fouilleuse. Elle paraît aussi çà et là à l'ouest et au sud; elle caractérise la base du terrain houiller.

B. L'étage houiller proprement dit est composé d'une série de schistes et de grès à grains fins, alternant avec un petit nombre de couches de houille et formant ensemble un massif de 80 à 120 mètres de puissance; dans toute la partie étroite du bassin, on ne connaît qu'une seule couche donnant un combustible peu estimé, et dont la puissance varie de 1 à 5 mètres; elle n'a pu être exploitée d'une manière suivie qu'à Tartaras (elle porte le n° 4, coupe *a*).

A l'ouest de Besançon, les couches se multiplient. On trouve d'abord à la base une couche dite *la gentille* qui est le prolongement de celle exploitée à Tartaras (n° 4). A 40 ou 50 mètres du toit de la gentille, se trouve la couche (n° 3) dite *la bourrue.* Sa puissance varie de 1 mètre à $1^{m},39$; elle donne un combustible dur, chargé de cendres. A 30 mètres plus haut vient *la bâtarde* (n° 2), qui est dans tout le district inférieur de Rive-de-Gier divisée en deux parties distinctes par un banc de grès dont l'épaisseur maximum est de 7 à 8 mètres; les mineurs désignent ce banc sous le nom de *nerf.* Les deux parties réunies de la bâtarde ont ensemble 4 mètres dans la concession de la Grand-Croix. A 25 mètres et souvent 40 mètres de la bâtarde, se trouve enfin la couche principale du système de Rive-de-Gier, la *grande masse,* marquée (1) dans les coupes (*d*) et (*e*). La grande masse commence, pour ainsi dire, à zéro, au plateau des grandes flaches, atteint 3 à 4 mètres sous la partie basse de la ville, 6 à 8 mètres dans la concession de Verchères, et jusqu'à 10 mètres dans la Grand-Croix. En quelques points elle se renfle jusqu'à 15 mètres. La houille de la grande masse est généralement dure et peu collante dans le district oriental; grasse et bonne pour le coke à la Grand-Croix.

C. L'étage houiller proprement dit de Rive-de-Gier est recouvert par un conglomérat puissant, poudingue à galets roulés et à ciment

de grès. Son épaisseur, nulle sur les bords du bassin, s'élève aux environs de Saint-Chamond à plus de 500 mètres, et sur toute cette hauteur il ne renferme pas une seule couche de houille. Le conglomérat supérieur se distingue de la brèche de la base, non-seulement à cause de la forme essentiellement différente des fragments, mais encore parce que les galets quartzeux sont nombreux dans le conglomérat et manquent presque entièrement dans la brèche.

2°. Système inférieur de Saint-Étienne.

Ce système offre deux étages :

D. L'étage inférieur comprenant l'ensemble des couches de houille;

E. L'étage supérieur formé par un conglomérat stérile (les deux étages se reconnaissent sur les coupes par l'absence de notation particulière).

La *fig.* 12, *Pl. VI,* représente la coupe passant par Saint-Chamond et qui rend compte de la position relative de ce système avec celui de Rive-de-Gier.

D. Le premier étage du système inférieur de Saint-Étienne succède immédiatement au conglomérat supérieur de Rive-de-Gier. Il se compose d'une grande couche de houille (marquée 13 dans les coupes *g* et *h*) qui se retrouve partout, depuis Saint-Chamond jusqu'à Firminy, et d'un ensemble de petites couches, soit supérieures, soit inférieures à la grande, dont l'allure est beaucoup moins régulière. La couche 13 est appelée *couche de l'Étang* à Méons, *grande couche de Villars* dans la concession de ce nom, couche *Siméon* à Roche-la-Molière, couche de *Latour* à Firminy. Les failles nombreuses qui sillonnent cet étage rendent très-difficile de reconnaître le nombre réel des couches de houille qu'il renferme La puissance utile de la grande couche varie ordinairement de 3 à 6 mètres, mais elle atteint aussi 8 mètres. Elle fournit tantôt des charbons recherchés pour le coke, tantôt des charbons très-ordinaires. Au-dessous de la couche 13, on trouve la couche 14 (coupe *g*), composée de deux couches de $1^m,30$ à $1^m,60$, séparées par des schistes d'une épaisseur de $0^m,50$ à 2 mètres. C'est la couche dite *des Roches*. A 120 mètres environ au-dessous de cette couche 14, se trouve la couche dite *de la Vaure* (15, coupe *g*), qui seule dans tout le bassin fournit une houille trop maigre pour produire du coke.

E. Le second étage du système inférieur de Saint-Étienne se compose d'un dépôt stérile d'un conglomérat à galets micaschisteux dont la puissance varie de 35 à 200 mètres.

3°. Système moyen de Saint-Étienne.

Il se compose de deux étages :

F. L'étage inférieur comprenant la partie houillère;

G. L'étage supérieur essentiellement formé par un conglomérat stérile (les hachures indiquent ce système sur la carte et dans les coupes).

La *fig.* 13, *Pl. VI,* est une coupe qui indique la relation avec les deux systèmes inférieurs.

F. Au conglomérat qui termine le système inférieur, succède une nouvelle alternance de grès fins, de schistes et de couches de houille, et là on observe aussi une couche principale dite la *troisième*, et une double série de petites couches, l'une inférieure, l'autre supérieure. La grande couche (n° 3, coupe *h*), dans les mines de Treuil et de Bérard, a une puissance de 3 à 4 mètres; à Firminy, elle atteint 10 à 15 mètres. Elle fournit tantôt du charbon propre au gaz d'éclairage, tantôt du charbon estimé pour la forge et le coke. Au-dessous de cette couche il y en a sept autres portant les nos 4 à 10, et au-dessus on en rencontre ordinairement deux. Toutes ces couches sont exploitées dans diverses concessions.

G. Un massif à peu près stérile, renfermant en quelques points une ou deux faibles veines de houille et dont la puissance moyenne est de 130 à 140 mètres, forme le système moyen. Ce massif est formé de grès plus ou moins grossiers, entremêlés de quelques bancs de conglomérat.

4°. Système supérieur de Saint-Étienne.

Il se compose :

H. D'un étage houiller;

I. D'un conglomérat stérile; le dernier terme du terrain houiller de la Loire (des hachures entre-croisées indiquent ce système sur la carte et la coupe).

La *fig.* 14, *Pl. VI*, montre les rapports de ce système avec les trois qui lui sont inférieurs.

H. L'étage houiller du système supérieur comprend une série de couches alternant avec des grès. Il est fort riche au bois d'Avèze, où l'on trouve huit couches de houille, dont l'une, la couche des Rochettes, a 2 à 4 mètres de puissance.

I. La dernière couche de houille est recouverte par un conglomérat très-grossier, remarquable par une grande abondance de cailloux quartzeux et par un ciment éminemment micacé, tantôt gris, tantôt rougeâtre; au bois d'Avèze il a 100 mètres. Ce dernier étage est complétement stérile.

En résumé, le terrain houiller de Saint-Étienne renferme :

1°. A. Système de Rive-de-Gier.	4	couches, épaisseurs réunies, de		12 à 14m
B. Roche la-Molière et Fraisse.	2	id.	id.	3 à 5
2°. Système inférieur...........	7	id.	id.	10 à 12
3°. Système moyen.........	9 à 10	id.	id.	10 à 20
4°. Système supérieur :				
Au bois d'Avèze.........	8	id.	id.	15 à 20
A la Chauvetière........	3	id.	id.	» 5
En tout......	33 à 34	couches, épaisseurs variant de		50 à 76m

Toutes les coupes précédentes établissent que le système de Rive-de-Gier passe sous les systèmes supérieurs de Saint-Chamond et de Saint-Étienne; il n'en résulte pas nécessairement que les couches de houille elles-mêmes se retrouveront partout sous le territoire de Saint-Chamond et de Saint-Étienne; et d'ailleurs, M. Gruner pense que, pour retrouver la grande masse et la bâtarde du district de

Rive-de-Gier, au centre du bassin, il faudrait à Saint-Chamond aller les chercher au moins à 600 mètres de profondeur, et à Saint-Étienne, en beaucoup de points, à plus de 1 000 mètres, même 1 200 et 1 300 mètres du jour.

L'ensemble des quatre systèmes du bassin de la Loire peut être représenté par la *fig.* 15, *Pl. VI,* qui représente une coupe dirigée du nord-ouest au sud-est et passant par le Pilat.

. Elle montre comment les couches, généralement puissantes et peu inclinées au nord-ouest, deviennent plus minces et prennent une plus grande inclinaison au sud-est, sur les flancs du mont Pilat, qui a soulevé cette partie du bassin.

ORIGINE DE LA HOUILLE.

Les couches de grès et de schistes argileux qui accompagnent la houille, contiennent un grand nombre de débris appartenant à des végétaux. Souvent ces empreintes végétales reproduisent, avec une netteté surprenante, les parties les plus déliées et les plus délicates des dessins superficiels que l'on observe sur les tiges et les feuilles des plantes. Quelquefois on voit qu'au milieu des argiles schisteuses les parties charnues ou solides de ces végétaux se sont couvertes de houille très-éclatante, et que d'autres fois ils ont éprouvé une substitution de matières étrangères. Les grès contiennent, ainsi que les argiles schisteuses, une grande quantité de restes de végétaux; mais ces empreintes ne sont parfaitement caractérisées, que lorsque la roche est un grès à grains d'une extrême ténuité; ce sont plus souvent des tiges que des feuilles que l'on rencontre dans les grès, et qui sont généralement couchées et comprimées dans le sens des feuillets de la roche.

Dans plusieurs cas, cependant, on a trouvé de grandes tiges qui semblaient être encore en place.

Dans la mine du Treuil (bassin Saint-Pierre) on a trouvé, suivant l'expression de M. Brongniart, une véritable forêt fossile de végétaux monocotylédons comme pétrifiés sur place; on a remarqué aussi que les tiges fossiles traversent les différentes strates dont se compose l'assise du grès. Souvent même les surfaces de séparation sont marquées par un glissement horizontal, peu étendu, il est vrai, mais suffisant pour rompre, dans plusieurs points, la continuité de ces tiges, en sorte que les parties supérieures sont comme rejetées de côté et ne font plus suite aux inférieures.

Les végétaux du terrain houiller ont été étudiés par M. Brongniart, qui a reconstitué la flore éminemment remarquable de cette époque; les espèces qui appartiennent aux genres les plus nombreux sont : les *Calamites*, les *Fougères*, les *Sigillaria* et les *Lepidodendron*.

FORMATION DE LA HOUILLE.

La concordance du grand développement des végétaux fossiles avec celui des couches de houille, ainsi que la présence de ces tiges que l'on rencontre à la place où elles ont vécu, dans les grès et dans les argiles du terrain houiller, ont conduit les géologues à regarder la houille comme le produit de la décomposition de végétaux accu-

mulés. On conçoit que les végétaux n'ont pu laisser aucune trace de leur forme dans la houille, tandis que ceux qui ont été saisis par la pâte qui a produit les argiles et les grès à grains fins, ont pu être conservés d'une manière parfaite. Quand on examine les houilles, on reconnaît que certaines variétés produisent beaucoup plus de cendres qu'il n'y en avait dans les végétaux dont elles ont été formées; ces variétés, en effet, sont formées de lames très-minces et superposées, composées les unes d'un charbon très-pur, et les autres d'un charbon mélangé de 20 à 25 pour 100 de matières terreuses; on voit donc que ces houilles sont formées d'alternances de parties pures résultant de la décomposition des végétaux et de parties produites par l'action d'eaux plus ou moins chargées d'argile; de plus, on a constaté que les végétaux qui ont donné lieu à la houille, appartiennent principalement à de petites espèces du genre *Calamites*. Ces observations ont alors conduit à regarder les couches de houille comme produites en grande partie par la croissance et l'accumulation sur place de petits végétaux vivant sur un sol couvert d'une couche d'eau peu profonde, dans des bassins dont le sol s'enfonçait progressivement sous le poids des débris déjà accumulés. Cette origine est très-semblable à celle des tourbières.

DES COMBUSTIBLES MINÉRAUX.

La nature présente plusieurs combustibles minéraux non métalliques: les uns, très-abondants, sont employés dans les usages domestiques; les autres ne sont que des raretés minéralogiques, ou ne peuvent être employés que pour objet d'ornement, comme le succin ou l'ambre, le mellite, etc.

Les combustibles employés dans les usages domestiques sont à l'état charbonneux, à l'état bitumineux, ou sous ces deux états à la fois.

Ils brûlent tous à une température peu élevée, avec flamme et en dégageant une odeur prononcée; ils sont fragiles et tendres; leur pesanteur spécifique ne dépasse pas 1,6.

Les principes constituants des combustibles sont essentiellement le carbone, l'hydrogène et l'oxygène; on y trouve, en outre, une certaine quantité de matières terreuses, et plus rarement de l'ammoniaque.

Tous les combustibles doivent leur origine à la destruction de végétaux enfouis. L'altération que les substances végétales ont éprouvée, par suite de leur enfouissement et des phénomènes différents auxquels ils ont été soumis, a donné naissance à des produits analogues à ceux que l'on obtient par l'incinération et la distillation de ces mêmes corps; on peut en distinguer trois groupes : les résines, les bitumes, les charbons fossiles.

Leur séparation n'est pas complète: ce qui tient à ce que souvent les bitumes s'allient, en proportions très-variables, avec les résines et les charbons. Il en résulte que les espèces sont très-difficiles à limiter, et que leur séparation est fondée sur une moyenne de caractères qui, laissant du vague et de l'incertitude, permet d'en faire varier le nombre, selon le point de vue auquel on se place. Nous ne parlerons que des bitumes employés dans les constructions et des combustibles d'une exploitation utile.

ASPHALTE.

La plupart des bitumes que le règne minéral produit semblent se rapporter à cette espèce, ou être un mélange d'asphalte et de pétrole.

L'asphalte présente une cassure toujours homogène et brillante; il est d'un noir foncé, d'un noir de poix, d'un brun noirâtre; par le frottement, il se charge d'électricité négative; sa densité varie de 1,07 à 1,20; il entre en fusion à la température de l'eau bouillante, s'enflamme facilement, et brûle avec une flamme luisante, en répandant une fumée épaisse et laissant peu de cendres; à la distillation sèche, il donne une huile bitumineuse particulière, très-peu d'eau, des gaz combustibles et des traces d'ammoniaque. Il laisse environ un tiers de son poids de charbon, lequel produit, par la combustion, une petite quantité de cendres contenant de la silice, de l'alumine, de l'oxyde de fer et quelquefois un peu de chaux et d'oxyde de manganèse.

Aujourd'hui que l'asphalte est devenu une matière importante pour les constructions, notamment pour faire des enduits dans les lieux humides, ainsi que pour la construction des trottoirs, on recherche ce bitume avec soin. En France, il en existe à Seissel, où il est disséminé dans un grès tertiaire; à Lobsan, dans un terrain analogue; à Dax, on le trouve dans un sable tertiaire : dans ce dernier gisement, l'asphalte paraît en relation avec les ophites qui se sont fait jour au milieu de ce terrain; l'asphalte de Monestier (Cantal) appartient aux terrains volcaniques; il est disséminé dans un tuf basaltique. Il faut ajouter à ces deux genres de gisements, aujourd'hui très-nombreux, le bitume disséminé dans les calcaires, qui joue un rôle très-important dans l'industrie. A Seissel, indépendamment du bitume liquide qui est dans le grès tertiaire, il existe un calcaire bitumineux également exploité.

Une seconde variété de bitume, également employé à beaucoup d'usages, est la poix minérale ou *malthe*. Cette substance, connue aussi sous le nom de *bitume glutineux*, *goudron minéral* et de *pisasphalte*, est molle et glutineuse; les bitumes de Dax, du Puy-de-la-Poix, s'y rapportent par conséquent aussi bien qu'à l'asphalte; le malthe toutefois est constamment mou, tandis que l'asphalte devient solide. Le malthe contient ordinairement de l'huile de naphte, et c'est à sa présence qu'est dû le ramollissement de ce bitume; il offre une espèce de passage entre l'huile de pétrole et l'asphalte, se rapprochant d'autant plus de la première qu'il contient plus de pétrole, et réciproquement.

CHARBON DE TERRE.

On désigne d'une manière générale sous le nom de *charbons de terre* les combustibles fossiles qui se trouvent en grand dans la nature, et qui laissent à la distillation une proportion de coke toujours considérable. Ces minéraux fournissent des combustibles d'un emploi varié, suivant leur richesse en charbon, leur état d'agrégation, l'abondance et la nature des matières volatiles qu'ils contiennent, enfin la quantité de cendres qu'ils laissent en brûlant. Les différences dans la composition des charbons de terre sont, en général, en rapport avec l'ancienneté des terrains dans lesquels ils sont enclavés. Cette cir-

constance a fait réunir tous ces combustibles dans les quatre groupes suivants : le *graphite*, les *anthracites*, les *houilles*, les *lignites*.

Les anthracites se rencontrent principalement dans les étages du terrain paléozoïque inférieur au système carbonifère, les houilles dans le terrain houiller, et les lignites dans les terrains postérieurs à la formation houillère. Mais ces divisions ne sont pas absolues, car on trouve dans les terrains houillers des couches anthraciteuses. Les anthracites de l'Amérique du Nord, par exemple, appartiennent au terrain du calcaire carbonifère ; les calcaires jurassiques des Alpes contiennent à la fois du graphite et de l'anthracite. Quant à la houille, on en rencontre dans le terrain dévonien des Asturies et dans le calcaire carbonifère.

GRAPHITE.

Le graphite renferme 95 à 96 pour 100 de carbone. Cette richesse en carbone l'a souvent fait considérer comme du carbone natif, et l'on en a souvent réuni la description à celle du diamant. Mais les impressions végétales que l'on observe fréquemment dans les roches au milieu desquelles il est enclavé, conduisent à placer le graphite au rang des combustibles fossiles dont il ne possède cependant aucun des caractères extérieurs ; il est d'un gris demi-métallique qui rappelle celui de certains métaux, et le fait vulgairement désigner sous le nom de *mine de plomb*, bien qu'il ne renferme pas une trace de plomb. Il est constamment cristallin, doux et onctueux au toucher, tendre, s'égrène sous les doigts et laisse, si on le frotte sur le papier, des taches d'un gris métallique plombé. La propriété de laisser des traces sur le papier le rend d'un usage précieux pour la fabrication des crayons : c'est le graphite qui forme la base des crayons de Comté.

ANTHRACITE.

Les anthracites sont d'un noir grisâtre, toujours doués d'un éclat demi-métallique souvent très-prononcé ; elles brûlent très-difficilement à cause de leur compacité ; elles ne s'embrasent que lorsqu'elles sont en grandes masses et soumises à une chaleur très-élevée ; les morceaux isolés s'éteignent presque immédiatement ; ils ne s'agglutinent pas entre eux, comme cela a lieu généralement pour la houille. L'anthracite décrépite à la première impression de la chaleur ; cette circonstance a empêché jusqu'à présent de l'employer seule pour le travail des hauts fourneaux ; les petits fragments dans lesquels elle se divise encombrent le fourneau, s'opposent à la circulation de l'air, nuisent à la combustion et arrêtent la fusion des minerais.

HOUILLES.

Les houilles sont généralement d'un beau noir ; leur cassure est souvent lamelleuse ou plutôt schisteuse ; elles sont fragiles et peu dures ; leur poussière est noire. Elles sont très-peu hygrométriques, elles donnent à la distillation du gaz combustible, de l'eau souvent ammoniacale, des huiles bitumineuses et un charbon dur, brillant, d'un gris d'acier, appelé *coke*. La plupart des houilles se ramollissent au feu et leurs fragments s'agglutinent, tandis que d'autres (houilles sèches) conservent leurs formes et ne s'agglomèrent pas ; les houilles

sèches forment le passage aux anthracites. La quantité de coke que laisse une houille varie avec la température ; cependant la différence est peu grande, elle est au plus de 6 pour 100. Les houilles les plus médiocres produisent au moins 45 pour 100 de coke ; la majeure partie des houilles en donne 60 ; pour quelques-unes qui se rapprochent alors des anthracites, cette proportion s'élève à 85 pour 100. Les matières volatiles sont des mélanges, en proportions très-variables, d'hydrogène carboné, de gaz oléfiant, d'hydrogène pur, d'oxyde de carbone, d'acide carbonique, d'azote, de vapeur huileuse, d'hydrogène sulfuré et d'un peu d'ammoniaque ; la proportion relative de ces substances dépend de la nature de la houille et du degré de chaleur auquel on la soumet ; elle n'est pas non plus la même aux différentes époques de l'opération : la houille distillée en grand dans les usines à gaz d'éclairage fournit moyennement 300 litres de gaz par kilogramme ; pour certaines houilles, cette proportion s'élève jusqu'à 400 litres.

LIGNITES.

Nous comprendrons sous le nom de *lignites*, les combustibles fossiles de formation postérieure au terrain houiller. Ces combustibles ont des caractères très-variables : les uns, d'un noir foncé et homogène, offrent une grande analogie avec la houille ; les autres possèdent encore le tissu ligneux d'une manière si complète, qu'il est facile de déterminer le genre de végétaux d'où ils proviennent. Dans cette dernière espèce de lignites, il existe encore des variations considérables, suivant le degré d'altération des végétaux : le jayet, par exemple, est d'un noir parfait, tandis que certains bois bitumineux d'un roux brunâtre ont presque conservé la couleur du bois. La réunion de ces combustibles est tres-rationnelle, quand on les étudie sous le rapport de leur emploi dans les arts, de leur composition, enfin de leur gisement.

Les lignites contiennent 40 à 50 pour 100 de charbon ; cette proportion dépend, comme pour le bois, de la température à laquelle on opère la distillation. Ils ne fondent pas et leurs fragments ne s'agglutinent pas comme cela a lieu pour la houille ; à la distillation, ils donnent du gaz, de l'eau acide et des huiles. Ils brûlent avec une flamme longue accompagnée de fumée, et produisent en brûlant une odeur désagréable et piquante, différente de l'odeur bitumineuse due en partie à l'acide pyroligneux qu'ils contiennent encore. La flamme se manifeste avant que le lignite soit rouge ; elle est due, comme pour le bois, à un dégagement de gaz qui se fait à une température peu élevée. Quand la flamme de la houille est éteinte, celle-ci se couvre d'une cendre blanche et cesse de brûler presque aussitôt après ; les lignites se couvrent bien également d'une cendre blanche, mais ils continuent à brûler, ainsi que cela a lieu pour la braise. Ce caractère constant suffit pour distinguer certains lignites à texture compacte de la houille dont ils se rapprochent beaucoup par les caractères extérieurs.

TOURBES.

Les tourbes forment les couches le plus souvent superficielles qui représentent le premier degré de décomposition des végétaux. Elles se rencontrent surtout dans les vallées marécageuses, sur des plateaux,

et dans les embouchures où les eaux séjournent; les sources du Rhin, les vallées de la Somme, l'embouchure de la Loire et quelques bas-fonds dans les Vosges sont des gisements riches en tourbe. La nature des plantes herbacées, pour la plupart du genre *Sphagnum*, qui forment la tourbe, ainsi que les circonstances dans lesquelles leur altération a lieu, produisent plusieurs variétés parmi lesquelles nous distinguons la tourbe compacte ou limoneuse, la tourbe fibreuse et la tourbe piciforme.

SYSTÈME PERMIEN.

Le dépôt du terrain houiller a été interrompu par la formation d'une série de dislocations que M. Élie de Beaumont a distinguées sous le nom de *système du nord* de l'Angleterre (direction S. 5° E. au N. 5° O.), et alors se sont produites de nouvelles couches sédimentaires qui constituent le système permien.

Le tableau suivant fait connaître la composition de ce terrain, ainsi que les soulèvements qui se sont produits avant et après son dépôt.

GRÈS DES VOSGES.

Système des Pays-Bas et du sud du pays de Galles — Direction E. 5° S. à O. 5° N.

Terrain permien.	Zechstein (calcaire magnésien des Anglais).
	Schistes à poissons du Mansfeld.
	Grès rouges (Rothe todte liegende).

Système du nord de l'Angleterre. — Direction S. 5° E. à N. 5° O.

Terrain houiller.

Système permien de la Thuringe.

Ce système se divise en trois groupes, à savoir, de bas en haut : 1° le groupe des grès rouge; 2° celui des schistes cuivreux, et 3° le groupe de zechstein.

1°. **Groupe de grès rouge.** — Il se compose d'un ensemble de couches arénacées dont les premières sont des poudingues à gros fragments, passant par des nuances successives aux dernières qui sont des grès à grains fins. Ces roches sont toutes remarquables par leur couleur rouge plus ou moins prononcée, et par leur pauvreté en minerais de cuivre; cette double raison a conduit les mineurs de la Thuringe à donner à ce système le nom de *rothe todte liegende*. Les conglomérats inférieurs du rothe renferment souvent des fragments de porphyre, roches qui ont fourni les matériaux dont se compose le terrain.

2°. **Groupe des schistes cuivreux.** — Le rothe todte liegende supporte un triple système de couches : d'abord des assises de schistes argileux grisâtres, sur lesquelles repose une couche plus épaisse d'un schiste bitumineux, se présentent en feuillets très-minces. Ce schiste noir contient ordinairement des sulfures de cuivre disséminés dans sa masse; il est l'objet de nombreuses exploitations dans tout le pays de Mansfeld. Le kupfer schiefer est recouvert par un schiste gris assez clair appelé *dach* par les mineurs, parce qu'il forme le toit des mines de schistes cuivreux.

On rencontre des ossements de sauriens et plusieurs poissons remarquables dans la formation du schiste cuivreux : tels sont les *Palæoniscus freieslebein*, *Palæoniscus magnus*.

3°. **Groupe du zechstein.** — La formation des schistes cuivreux est recouverte par un système assez puissant de couches de calcaire et de dolomie. Les premières constituent le zechstein, calcaire gris de cendre, compacte, à cassure conchoïde, caractérisé par la présence du *Productus horridus* qui y abonde. Au zechstein succèdent des assises de dolomie tantôt caverneuse, tantôt argileuse et rude au toucher, et à la partie supérieure un calcaire fétide contenant souvent des amas de gypse.

Système permien de l'Angleterre.

Ce terrain est formé par plusieurs assises de calcaire dolomitique, accompagné de marnes rougeâtres contenant des amas de gypse; il correspond au zechstein de la Thuringe.

Système permien de la Russie.

Ce terrain occupe de vastes espaces et constitue une plaine ondulée qui se dirige jusqu'au pied de l'Oural. Il est composé d'un ensemble de couches de grès rouge, de calcaire blanchâtre et de grandes masses de gypse; les grès, imprégnés de sulfure de cuivre, sont exploités comme minerais de cuivre.

Le système permien avait été désigné sous le nom de terrain pénéen, parce qu'on le croyait dépourvu de fossiles et pauvre en minerais métalliques; mais la découverte d'un grand nombre d'espèces fossiles et de gisements importants de minerais métalliques dans les couches de ce système en Russie, a conduit à abandonner cette dénomination pour la remplacer par celle de système permien, rappelant le rôle que joue ce terrain dans la constitution du gouvernement de Perm en Russie.

Système permien dans les Vosges.

Le système permien n'a été rencontré en France que dans les Vosges; il est représenté par le terrain de grès rouge.

Grès rouge. — Ce terrain est concentré dans certaines dépressions des Vosges, dont il paraît avoir comblé le fond. Quelquefois il repose directement sur les roches cristallines ou sur les tranches des couches schisteuses anciennes, mais quelquefois il en est séparé par le terrain houiller, qui occupe quelques parties du fond de ces mêmes bassins.

L'étude des environs de Ronchamp (Haute-Saône) fait connaître la composition du terrain de grès rouge; le grès rouge est en ce point superposé directement au terrain houiller. Au-dessus du point le plus bas, atteint par les travaux d'exploitation qu'on a ouverts sur la couche de houille principale et qu'on a conduits en s'enfonçant suivant sa pente, on a creusé en 1821 un puits d'extraction qui a percé sur une hauteur de plus de 100 mètres toutes les couches dont elle est recouverte. Au-dessus de l'argile schisteuse noire qui sert de toit à la houille, on a rencontré : 1° une argile solide, peu dure, à cassure unie, renfermant un grand nombre de paillettes de mica blanchâtre; cette roche est la première assise du terrain de grès rouge; 2° au-dessus se trouve une assise épaisse de poudingue contenant des fragments aplatis, de grosseur variable, de schiste argileux verdâtre, tendre, des fragments de roches feldspathiques et des cristaux de feldspath prove-

nant de la destruction des roches cristallisées préexistantes ; le ciment est argileux et d'un rouge amarante ; 3° au-dessus du poudingue on rencontre une couche d'argilolithe amarante et des assises successives de grès de divers grains, et de terre rouge semblable à celle que l'on voit au jour sur les flancs des collines situées entre la houillère de Ronchamp et la chapelle de Bourg-lès-Monts.

Grès des Vosges. — Le noyau central des Vosges est entouré par d'autres montagnes, dont les formes aplaties et carrées contrastent avec les profils arrondis des premières et qui sont composées d'un grès particulier, connu sous le nom de *grès des Vosges*.

Ce grès présente des caractères constants dans tout l'espace qu'il occupe ; il est toujours essentiellement formé de grains amorphes de quartz, dont la grosseur varie, depuis celle d'un grain de millet jusqu'à celle d'un grain de chènevis. Leur surface extérieure paraît fréquemment présenter des facettes cristallines et réfléchit vivement les rayons du soleil ; elle est généralement recouverte d'un très-léger enduit coloré en rouge par du peroxyde de fer, ou quelquefois en jaune par du fer hydraté ; mais on reconnaît aisément qu'à l'intérieur les grains de quartz sont incolores et translucides. Les couches successives, dont l'épaisseur varie de $0^m,50$ à 1 mètre, se distinguent les unes des autres par des nuances de couleur, par de petites différences dans le grain et la cohésion, par la faculté plus ou moins grande de résister aux intempéries de l'air, et par l'absence ou l'abondance plus ou moins grande de galets d'une nature particulière, propre au grès vosgien, et qui en font souvent un poudingue à pâte de grès. Il n'existe pas une dégradation continue de grosseur et de caractère qui permette de regarder les grains quartzeux du grès des Vosges comme étant la limite extrême des galets qu'il contient. Ces cailloux plus ou moins arrondis forment une classe bien distincte de celle des grains quartzeux essentiellement anguleux et d'apparence souvent cristalline, qui sont l'élément principal du grès.

Les fossiles sont très-rares dans les grès des Vosges, cependant on a trouvé dans les poudingues des empreintes bien conservées de *Calamites arenaceus*.

Matériaux de construction que présentent les terrains paléozoïques.

Les terrains paléozoïques présentent une assez grande variété de roches parmi lesquelles les quartzites et les schistes dominent dans la partie inférieure de ces terrains, et les grès et les calcaires dans la partie supérieure. Ces terrains sont presque toujours accompagnés de masses éruptives de granite, qui sont susceptibles de fournir les pierres les plus solides et les plus durables ; mais ces dernières roches, coûteuses à extraire des carrières et à tailler, ne peuvent être employées que pour des constructions de luxe et dans les travaux publics. Le granite pouvant supporter des transports considérables, on emploie à Paris, avec de grands avantages pour la construction des dallages et des bordure de trottoirs, du granite exploité près de Cherbourg. Quant aux constructions particulières, les terrains paléozoïques inférieurs ne peuvent leur fournir que des moellons de roches quartzeuses et des schistes avec lesquels on ne peut faire que des constructions

fort médiocres; mais en revanche on exploite dans ces mêmes terrains des schistes tégulaires qui fournissent la couverture la plus élégante et la plus légère. Les meilleures ardoises proviennent des carrières d'Angers. Les ardoises de Famay dans les Ardennes ne possèdent pas les mêmes qualités.

Les terrains dévonien et carbonifère présentent des calcaires compactes et solides, que l'on exploite non-seulement comme pierre d'appareil, mais comme marbres. La Belgique fournit une grande quantité de ces marbres, connus sous le nom de *petits granites*. Ces calcaires donnent en outre une pierre à chaux d'excellente qualité.

Le terrain houiller proprement dit ne fournit que des grès qui soient susceptibles d'être employés dans les constructions. Quelquefois ces roches sont presque exclusivement quartzeuses et très-résistantes : Saint-Etienne est bâti avec cette variété de grès; mais le plus souvent le grès houiller est mélangé de feldspath et se décompose très-facilement : il ne donne alors que des matériaux peu solides et peu durables. Les schistes houillers se délitent à l'air, et ne peuvent pas même être employés comme moellons.

DU TRIAS.

Le dépôt du grès des Vosges a été interrompu par l'apparition du système du Rhin dont la direction court du N. 21° E. au S. 21° O ; après ce phénomène s'est produite la formation du trias.

Le trias peut être considéré comme un groupe composé de trois membres dont le tableau suivant fait connaître la relation.

TERRAIN JURASSIQUE.

Système de Thuringerwald. — Direction O. 40° N. à E. 40° S.

Trias...........	Marnes irisées (Keuper). Muschelkalk. Grès bigarré (Bunter-sandstein).

Système du Rhin. — Direction N. 21° E. à S. 21° O.

Grès des Vosges.

Le trias se montre en un grand nombre de points de la France : dans la Lorraine, sur les contours du plateau central et dans le département du Var. Ce terrain mérite une étude spéciale et détaillée à cause des substances utiles qu'il renferme; car c'est l'un des gisements habituels du sel gemme, du gypse et de certains combustibles, et de plus on en retire d'excellentes pierres de construction.

Trias de la Lorraine.

Lorsque des cimes élevées des Vosges, telles que le Hohneck ou le Donon, on promène ses regards vers l'ouest, on voit s'étendre, au pied des montagnes, des terrains qui paraissent plats et qui sont bornés dans le lointain par des lignes de coteaux à profils rectilignes et horizontaux. Ces coteaux sont les bords proéminents du grand dépôt jurassique ; ils règnent de Langres à Longwy suivant une ligne continue, mais légèrement festonnée et découpée par plusieurs rivières, telles que la Meurthe et la Moselle. Au pied des escarpements de cette

grande falaise jurassique, commence une contrée plus basse qui s'étend jusqu'au pied des Vosges. Ces montagnes la terminent à l'est par une falaise presque continue; cette contrée présente des séries d'ondulations plus ou moins interrompues, qui vont généralement en diminuant de saillie et de profondeur, à mesure qu'on approche des montagnes. On y remarque même quelques protubérances qui rivalisent presque en hauteur avec la falaise jurassique, dont elles suivent à peu près les contours, mais qui sont loin de l'égaler en continuité. Cette contrée basse, qui forme la Lorraine, est constituée par les trois étages du trias. Au milieu des ondulations variées et d'une apparence généralement irrégulière que présente le terrain de profil, l'inclinaison et la position étagée de ces trois grandes assises se prononcent cependant à l'horizon, quand on l'observe d'un point élevé et dans une position convenable. Le profil offre en effet trois ressauts correspondants à trois bandes distinctes, et les affleurements de ces trois étages superposés traversent la Lorraine du nord au sud.

La *fig.* 16, *Pl. VII*, représente une coupe prise aux environs de Lamarche; elle donne une idée de cette superposition.

(*a*) Grès bigarré; (*d*) Dolomie;
(*b*) Muschelkalk; (*e*) Gypse;
(*c*) Marnes irisées; (*k*) Grès infraliasique.

Le grès bigarré constitue une première bande située immédiatement au pied de la région montagneuse des Vosges. Plus loin le dépôt calcaire de muschelkalk s'élève brusquement au-dessus de lui; enfin sur le muschelkalk s'étend le grand dépôt des marnes irisées formant une série de collines qui constituent un terrain mamelonné à contours très-arrondis. Cette disposition est due à ce que les trois bandes s'enfoncent successivement l'une au-dessous de l'autre en plongeant du pied des Vosges dans l'intérieur de la France. Nous allons décrire chacune de ces trois bandes séparément.

1°. Grès bigarré. — Cet étage est formé d'une série de couches, dont les inférieures sont composées d'un grès à grains fins, le plus souvent d'un rouge amarante, contenant de petites paillettes de mica disséminées irrégulièrement. Ces premières couches sont fort épaisses, et fournissent partout de très-belles pierres de taille. En s'élevant davantage dans la formation, on en trouve de plus minces, qui sont exploitées pour faire des meules à aiguiser. Plus haut encore il en existe de très-minces et de très-fissiles, exploitées comme dalles pour paver les maisons et comme ardoises pour les couvrir. La fissilité de ces couches est due à la présence d'un grand nombre de paillettes de mica, constamment disposées dans le sens de la division schisteuse. Elles deviennent quelquefois très-peu consistantes et passent même à une argile bigarrée qui est employée comme terre à briques. Les assises supérieures de la formation du grès bigarré renferment souvent des couches peu épaisses de calcaire marneux et de dolomie qui lient cette formation à la suivante, celle du muschelkalk.

La formation du grès bigarré renferme, surtout dans ses couches supérieures, un grand nombre d'empreintes végétales. Ces plantes se présentent dans un état de conservation qui varie suivant les localités

et la consistance de la roche. Elles sont le plus souvent remplacées par une terre argileuse colorée en brun, par le fer oxyde hydraté. On trouve aussi dans le grès bigarré des ossements de sauriens et des empreintes et des moules de coquilles.

Le dépôt du grès bigarré a suivi celui du grès des Vosges, sans autre interruption que la révolution géologique qui, en disloquant les couches de ce dernier, en a élevé certaines parties pour en former des montagnes.

Des failles nombreuses ont produit des changements de niveau dans le grès des Vosges, et le grès bigarré s'est déposé sur le terrain de grès des Vosges ainsi descendu, et vient s'arrêter brusquement sur la face abrupte de la faille; il repose sur les poudingues de la partie supérieure du grès des Vosges, tandis que ces mêmes poudingues de l'autre côté de la faille couronnent le grès vosgien qui domine la formation du grès bigarré.

Cette disposition relative du grès des Vosges et du grès bigarré est clairement indiquée par la coupe suivante (*fig.* 17, *Pl. VII*) empruntée à l'*Explication de la carte géologique de la France* par MM. Elie de Beaumont et Dufrénoy.

(C) Grès bigarré;
(D) Grès des Vosges.

Cette coupe, prise aux environs de Lemberg, représente la disposition de la faille AB qui relève une partie du grès des Vosges en une série de montagnes dominant à l'est la plaine haute qui forme le grès bigarré; on y voit aussi que le grès bigarré repose en stratification concordante sur la partie non soulevée du grès des Vosges. Les premières assises du grès bigarré ressemblent au grès des Vosges et y passent par des nuances insensibles. Cependant la présence d'une plus grande quantité de mica fait reconnaître le grès bigarré.

2°. Muschelkalk. — Il constitue une bande qui traverse la Lorraine dans le milieu de la zone occupée par le trias, et présentant des caractères assez constants. Sa masse principale est formée par un calcaire compacte, à cassure souvent conchoïde, quelquefois inégale ou même terreuse, de couleur gris de fumée; souvent il est marbré de jaune; des veines de chaux carbonatée spathique traversent souvent en tous sens ce calcaire. Il contient aussi dans un grand nombre de ses couches des coquilles fossiles plus remarquables par le nombre des individus qui s'y rencontrent que par la variété des espèces; de là le nom de *calcaire coquillier*.

Le muschelkalk renferme des couches subordonnées de dolomie; elle est cristalline, ou bien compacte et à cassure terreuse, de couleur grise, jaune ou rougeâtre. On rencontre principalement la dolomie cristalline dans les assises du terrain qui sont au contact du grès bigarré. Il renferme aussi des assises marneuses. Les marnes se présentent en couches minces, sur une grande épaisseur, à la partie supérieure du dépôt, ou interposées entre les différentes assises calcaires: elles sont grises, brunes, jaunes, verdâtres et même tout à fait noires, calcaires, argileuses ou sableuses, tendres ou solides. On y remarque des noyaux calcaires, des veines de chaux carbonatée

fibreuse, et elles sont traversées par des fissures entre-croisées, remplies de chaux carbonatée.

Les marnes blanches de muschelkalk donnent une excellente terre pour les faïenceries de Lunéville; les argiles sont propres à la fabrication des tuiles, des briques et de la poterie.

3°. **Marnes irisées.** — Les marnes irisées forment, à l'ouest des deux bandes parallèles du grès bigarré et du muschelkalk, une troisième bande plus irrégulière et souvent plus large, qui traverse comme les deux premières la Lorraine du nord au sud. Cette bande présente à l'industrie un intérêt puissant à cause des masses considérables de sel gemme qu'elle recèle dans sa partie la plus large près de Vic et de Dieuze, des amas de gypse qu'elle renferme presque partout, et des couches de combustible qui s'y trouvent aussi en divers points, à un niveau presque constant. On peut y reconnaître trois étages. Les couches en contact avec le muschelkalk, et qui forment l'étage inférieur, sont des marnes schisteuses bariolées de rouge et de blanc. Elles renferment des amas de gypse, d'anhydrite et des masses de sel gemme. L'étage moyen est formé par une série de couches d'argile schisteuse, de grès, de dolomie d'un jaune isabelle; il renferme des dépôts charbonneux. Le calcaire dolomitique est à cassure terreuse, aigre au toucher, très-pauvre en débris de corps organisés. Les argiles schisteuses sont noirâtres, très-semblables à celles du terrain houiller; elles renferment des empreintes végétales et des couches d'un combustible d'assez mauvaise qualité. L'étage supérieur est composé par une grande série de marnes solides, à cassure conchoïde, non schisteuses, qui renferment des amas de gypse, mais peu d'anhydrite.

Du sel gemme. — La partie inférieure des marnes irisées de la Lorraine renferme du sel gemme, formant des couches régulières lenticulaires ou plutôt de vastes lentilles. La découverte de ces masses a eu lieu en 1819 dans un trou de sonde qui fut pratiqué au fond de la vallée à 1 kilomètre $\frac{1}{2}$ au sud-ouest de Vic, à gauche et près de la route de Dieuze à Nancy. Le sel gemme fut atteint pour la première fois le 15 mai 1819 à la profondeur de 65 mètres. Les couches de grès rougeâtre micacé, entrecoupé de calcaire gris et de gypse, qui avaient été percées avant d'arriver au terrain salifère, s'étendant horizontalement à une grande distance en tous sens, la continuité des bancs de sel gemme pouvait se présumer; de nombreux sondages ont révélé l'existence de sept couches de sel gemme, dont les épaisseurs réunies sont de 35^{m},9 à Vic, de 9^{m},30 à Rosières-aux-Salines, de 24 mètres à Pettoncourt, de 34^{m},90 à Mulcey.

La mine de Vic ayant été envahie par les eaux en 1825, on fit de nouvelles recherches à Dieuze, qui firent découvrir un gîte puissant qui est aujourd'hui en pleine exploitation.

Le sel gemme, considéré en grand, forme des masses compactes; en petit, il est exclusivement cristallin, et ces masses ne sont autre chose qu'un agrégat de cristaux, ne laissant pas le moindre vide entre eux et enchevêtrés en tous sens, comme cela arrive dans une cristallisation confuse. Le sel est le plus souvent vert de bouteille ou gris et vert, et est ainsi coloré par de l'argile bitumineuse; plus rarement il est blanc : il est habituellement mélangé avec une petite quan-

tité d'argile bitumineuse et de polyalithe, ou d'anhydrite. L'analyse n'y a fait découvrir d'autres substances étrangères que de l'argile, du sulfate de chaux, du sulfate de soude, des traces de sulfate de magnésie, mais jamais de chlorure de magnésium. Le sel rouge est coloré par l'oxyde de fer; sa densité est de 2,14 pour le sel blanc; 2,17 pour le sel gris, et 2,22 pour le sel plus impur : il n'est pas dur, il raye la chaux sulfatée, et il est rayé par la chaux carbonatée.

Gypse. — Cette substance est, après le sel gemme, la principale richesse minérale que recèlent les marnes irisées de la Lorraine. Ces deux substances, dont on a remarqué depuis longtemps que les gisements sont généralement convexes, offrent en Lorraine dans leurs allures des analogies frappantes, et cependant des différences notables. L'une et l'autre forment à la fois des masses lenticulaires et des systèmes de petits filons, mais les gisements gypseux sont buttés beaucoup plus en petit que le gisement salifère, et, par suite, il y a dans les marnes irisées de la Lorraine une multitude de gîtes de gypse, tandis qu'il n'y en a qu'un seul de sel gemme.

Chaque gîte de gypse dans son ensemble a la forme d'un gros tubercule, qui se divise en assises plus ou moins nombreuses et se termine d'une manière peu nette, par une multitude de ramifications.

La formation du trias de la Lorraine plonge sous le terrain jurassique, s'étend sous ce calcaire et va se montrer de nouveau au jour au pied des montagnes de la France centrale.

On peut étudier ce terrain s'appuyant sur les montagnes du Charolais et de Tarare, et sur le pourtour des montagnes du centre de la France.

Dans le département du Var, le trias forme une ceinture qui entoure complétement du côté de la terre les montagnes littorales. Cette ceinture se termine à la mer à ses deux extrémités près d'Antibes et de Toulon. Ce terrain est composé du grès bigarré pendant le dépôt duquel ont eu lieu les éruptions porphyriques, et du muschelkalk.

L'étage des marnes irisées n'a pas été encore constaté d'une manière bien certaine.

Trias de l'Allemagne et de l'Angleterre.

Ce terrain est très-développé dans la Souabe, où il occupe une grande partie de la contrée ; il présente trois étages bien caractérisés. L'étage inférieur, désigné sous le nom de *bundter-sandstein*, le plus puissant et le plus élevé des trois en Souabe, est généralement composé d'un grès assez pur, quoique coloré en rouge par l'oxyde de fer. L'étage moyen, celui du muschelkalk, peut être lui-même subdivisé en trois parties. La partie inférieure (wellenkalk) est formée de calcaire gris alternant avec des marnes en couches plus ou moins ondulées ; la partie moyenne se compose d'un ensemble de couches de calcaire, de dolomies, de marnes, renfermant des couches de sel gemme et des amas de gypse et d'anhydrite. Le sel gemme, qui ne se manifeste souvent que par des sources, est exploité dans les environs de Hall, où il existe un dépôt puissant de sel blanc et gris, mélangé d'anhydrite et d'argile.

On donne le nom de *système salifère* à cette partie moyenne de

muschelkalk. La partie supérieure est principalement composée d'un calcaire gris de fumée et gris-noirâtre, à cassure conchoïde, très-résistant; on l'exploite pour les constructions et surtout pour l'empierrement des routes; il passe dans sa partie supérieure à la dolomie. Ce calcaire renferme tous les fossiles habituels du muschelkalk. Le troisième étage, désigné sous le nom de *keuper*, qui représente celui des marnes irisées de la Lorraine, est principalement formé par des marnes bariolées de rouge, de violet, de bleu et de gris; il contient en outre de puissantes couches de grès, de dolomie, d'argiles schisteuses avec combustibles, et des amas de gypse. On trouve dans les grès de cet étage beaucoup de débris d'ossements de poissons et des mollusques.

Cet examen rapide du trias de la Souabe fait voir qu'il diffère de celui de la Lorraine par un caractère important, qui consiste en ce que le gîte salifère est placé dans le muschelkalk, tandis qu'il est à la partie inférieure de l'étage des marnes irisées en Lorraine.

Le trias se retrouve en Angleterre; mais ce terrain est composé de deux étages seulement : l'étage inférieur, celui du grès bigarré, appelé *new-red-sandstone* par les Anglais, au-dessus duquel se trouve un étage de marnes rouges; le muschelkalk y manque complétement.

TERRAIN JURASSIQUE.

Le terrain jurassique a succédé au trias, dont le dépôt avait été interrompu par la production du système de dislocations désigné sous le nom de *système de Thuringerwald*. Ce terrain constitue la majeure partie des montagnes du Jura, circonstance qui lui a fait donner le nom de *terrain jurassique*.

En France, en Angleterre et en Allemagne, le terrain jurassique recouvre de grands espaces, en présentant partout une uniformité remarquable dans la composition, les divisions générales et la distribution des fossiles dans les couches.

On peut subdiviser ce terrain en quatre groupes séparés les uns des autres par des couches d'argile et de marnes. Ces divisions sont naturelles, mais il ne faut pas les regarder comme répondant à des formations distinctes : le calcaire jurassique n'en comprend réellement qu'une seule, en ce sens qu'il ne s'est manifesté aucun soulèvement de montagnes entre celui qui a formé la période du trias et celui qui a marqué le commencement des dépôts crétacés. Ce sont simplement des phénomènes d'oscillation qui ont déterminé des modifications dans l'état des mers jurassiques, et par suite dans les dépôts qu'elles ont produits.

Le tableau suivant fait connaître les quatre divisions que présente le terrain jurassique, ainsi que les subdivisions qu'on peut observer en Angleterre et en France.

TERRAIN CRÉTACÉ.

Système de la Côte-d'Or. — Direction E. 40° N. à O. 40° S.

Formation oolithique.	Étage oolithique supérieur.	Calcaire de Portland.
		Argile de Kimmeridge; argile de Honfleur.
	Étage oolithique moyen.	Oolithe d'Oxford; calcaire de Lisieux.
		Coral-rag.
		Argile d'Oxford; argile de Dives.
	Étage oolithique inférieur.	Cornbrash.
		Forest marble; calcaire à polypiers.
		Argile de Bradford.
		Grande oolithe; calcaire de Caen.
		Fullers earth.
		Oolithe inférieure.
		Marnes et calcaires à bélemnites.
Lias ou calcaire à gryphées arquées.	Lias.	Lias bleu.
	Grès du lias.	Lias blanc; calcaire d'Osmanville.

Système de Thuringerwald. — Direction O. 40° N. à E. 40° S.

Trias.

Terrain jurassique en Angleterre.

Ce terrain commence en Angleterre par le lias. L'étage du lias est composé d'assises argileuses et de calcaire marneux bleu ; sa partie inférieure présente souvent un calcaire blanc, compacte. Cet étage, caractérisé surtout par la présence d'une huître, qui occupe dans le terrain un horizon constant et fournit un point de repère fort important pour les géologues, est aussi fort riche en débris de grands sauriens. La partie supérieure du lias est formée par des couches alternatives d'argiles marneuses et de sables marneux jaunâtres, au-dessus desquelles se montrent d'autres couches d'argiles bleuâtres très-schisteuses, et contenant des concrétions calcaires : on exploite ces argiles calcarifères pour ciment romain.

Les marnes supérieures du lias sont caractérisées par la présence d'un fossile particulier (les bélemnites) dont les restes abondent dans ces marnes.

Au-dessus des marnes supérieures du lias, que l'on peut considérer comme formant la base de l'étage inférieur de l'oolithe, commence l'oolithe inférieure. Les premières couches de ce terrain sont formées par des assises de sables ferrugineux, auxquelles succèdent des couches d'un calcaire oolithique dont la partie moyenne fournit de bonnes pierres de construction. L'oolithe inférieure est recouverte par un système argileux composé de diverses assises d'argiles bleues et jaunâtres avec des modules de marnes endurcies, dont la partie moyenne fournit une excellente terre à foulon. Ce système argileux est recouvert par la grande oolithe, système composé de plusieurs assises : l'assise moyenne très-puissante fournit d'excellentes pierres de taille, et les assises inférieures et supérieures sont formées par un calcaire fendillé, très-coquillier et très-grossier. Les assises supérieures sont souvent formées d'un sable calcaire composé de grains d'oolithes et de coquilles. L'étage de la grande oolithe est très-

développé aux environs de Bath, circonstance qui lui fait donner le nom d'*oolithe de Bath, étage bathonien*. Au-dessus de la grande oolithe, on observe d'abord un petit système argileux, caractérisé par la présence de nombreux débris d'un crinoïde particulier, qui supporte un système calcaire souvent schistoïde dans lequel on exploite un marbre pétri de coquilles et de polypiers. Ce système se lie avec un autre système formé par un calcaire grossier, souvent marneux, constituant de vastes plateaux en Angleterre, et qui termine l'étage oölithique inférieur. L'étage oolithique moyen commence par une argile marneuse bleuâtre, fort développée dans les environs d'Oxford, alternant dans sa partie inférieure avec un calcaire argileux appelé *kelloway-rock*. L'oxford-clay renferme de nombreux fossiles, parmi lesquels la *Gryphæa dilatata*, qui joue dans cet étage le même rôle que la *Gryphæa arenata* dans celui du lias. Au-dessus de l'oxford-clay, on observe des assises de grès calcaires recouvertes par le coral-rag, calcaire irrégulièrement fendillé et qui est composé en grande partie de polypiers provenant des récifs madréporiques qui existaient à cette époque dans la mer jurassique. Le coral-rag est recouvert par un système de couches fort développées à Oxford, d'un calcaire peu dur et grossièrement oolithique.

La formation jurassique se termine par le troisième étage oolithique; il commence par une assise de marne argileuse bleue, renfermant des pyrites disséminées, des couches très-bitumineuses et en même temps très-schisteuses : il atteint souvent 600 pieds de puissance ; on y rencontre des bancs entiers d'*Ostrea deltoïdea* et d'*Exogyra virgula*. Au-dessus du kimmeridge-clay se trouve un calcaire oolithique (portland-stone) souvent grenu, fournissant d'excellentes pierres de construction : ce calcaire atteint 120 pieds de puissance dans la baie de Portland.

Telle est la composition générale du terrain jurassique en Angleterre, formation dans laquelle les marnes l'emportent sur les calcaires, et où elles tracent trois horizons bien constants : le premier, servant de base à l'oolithe inférieure, recouvre le lias qui lui-même est un calcaire très-argileux ; le second (oxford-clay) est à la base de l'oolithe d'Oxford; et le dernier (kimmeridge-clay) est à la base de l'oolithe de Portland.

Terrain jurassique en France.

Ce terrain forme une large écharpe qui traverse obliquement la partie centrale de la France, des environs de Poitiers aux environs de Metz et de Longwy. Cette écharpe se recourbe d'une part vers le haut, du côté de Mézières, et de l'autre vers le bas, du côté de Cahors et de Milhau. Mais en même temps il s'en détache deux branches, dont l'une se repliant au nord-ouest se dirige sur Alençon et Caen, tandis que l'autre, descendant au midi, suit d'abord la Saône et ensuite le Rhône, depuis Lyon jusqu'au delà de Privas, et tourne autour des Cévennes jusqu'au delà de Montpellier. Ces bandes recourbées projettent en outre, dans différentes directions, des appendices irréguliers ; mais ce qu'elles présentent de plus remarquable, c'est qu'en faisant abstraction de ces irrégularités et en les réduisant par la pensée à leur plus simple expression, on voit ces bandes former deux espèces de boucles

qui déterminent sur la surface de la France une figure semblable à un 8 ouvert par en haut; les lacunes qu'on voit dans la boucle inférieure du 8 sont dues à des dépôts superficiels qui cachent le terrain jurassique. Au dehors du 8, le calcaire jurassique constitue deux massifs isolés, l'un dans les Alpes, l'autre dans les Pyrénées. Lié d'une manière intime avec les roches cristallines qui forment le noyau de ces montagnes, le terrain jurassique des Alpes et des Pyrénées a éprouvé des altérations profondes dans sa stratification, et quelquefois même dans sa texture, qui lui donnent des caractères particuliers que n'offre pas ce terrain dans les deux boucles du 8.

Le terrain jurassique forme autour de Paris une ceinture qui l'enveloppe presque de toutes parts au nord-ouest. Il constitue les côtes rocheuses du Calvados et se dirige ensuite, par une ligne sinueuse presque nord-sud, de l'embouchure de la Seine vers Poitiers. Près de cette ville, le terrain jurassique se courbe fortement vers le nord-est en suivant la limite des granites du Limousin et de la Bourgogne. Au delà de Chaumont, cette formation éprouve une nouvelle inflexion, et elle se dirige au nord-est, par une courbure uniforme, vers Mézières, en passant par Commercy et Verdun. Le terrain jurassique cesse près d'Hersoé; il y est caché par les terrains crétacés et par les terrains tertiaires, et on le voit de nouveau, dans le Boulonnais, recouvrir un espace considérable dans le plan même où il existait, si l'enceinte jurassique n'avait pas été interrompue un instant. Il résulte de cette disposition que les montagnes anciennes de la Bretagne, de la Vendée, du centre de la France, des Vosges, des Ardennes et du Boulonnais formaient, avant le dépôt du calcaire jurassique, les rivages d'un vaste bassin, ouvert seulement au sud-est et au nord-ouest, dans lequel les terrains jurassique, crétacé et tertiaire se sont successivement déposés. La disposition des parois de ce bassin, comprenant à la fois les vallées de la Seine, de la Marne, de la Somme, et une partie de celle de la Loire, était telle, qu'à l'est le grès bigarré a pu acquérir sur les pentes des Vosges une épaisseur considérable, tandis qu'à l'ouest, et sur la plus grande partie de son rivage sud, cette formation a manqué ou a été complétement recouverte. Mais à partir des couches inférieures du calcaire jurassique, le niveau de ce bassin a permis aux formations supérieures de se déposer sur toute la surface, et la série géologique est complète.

La coupe (*fig.* 18, *Pl. VI*) faite à travers ce bassin suivant une ligne qui passe par Mortagne, Paris et Metz, fait connaître les rapports de toutes ces formations. Elle montre que lorsqu'on quitte Paris pour se diriger vers Metz, on traverse successivement, au delà des limites des terrains tertiaires:

7. Assises de la craie blanche;
6. Assises du grès vert;
5. Assises supérieures;
4. Assises moyennes;
3. Assises inférieures;
2. Assises de l'oolithe jusqu'à la dernière;
1. Lias qui constitue le sol des environs de Metz.

Elle montre aussi que, sous le sol de Paris, les formations secon-

daires existent presque toutes, et que pour arriver par le sondage aux terrains qui leur sont inférieurs, il faut en traverser l'épaisseur entière.

Dans la vaste étendue que l'on vient d'assigner au calcaire jurassique du bassin du nord de la France, les caractères de cette formation présentent une assez grande constance; le relief en est constamment le même; il forme des collines aplaties, disposées par étages et terminées extérieurement par une falaise assez prononcée. Les différentes assises se recouvrent successivement en s'avançant vers le centre des deux bassins secondaires qui existent en France et qui correspondent aux deux boucles du 8 cité plus haut. Souvent une des parties des assises jurassiques manque; mais si l'on rétablit par la pensée les choses dans l'état où elles étaient avant le creusement des vallées, les chaînes qu'elles constituent deviennent à peu près régulières, et l'on remarque alors que, lorsqu'elles n'existent pas, cela tient tantôt à la forme du rivage de la mer jurassique, qui n'a pas permis aux couches inférieures du terrain de se déposer, tantôt à la dénudation qui a enlevé les couches supérieures. Les chaînes du terrain jurassique se succèdent en s'imbriquant comme les tuiles d'un toit; la base des collines est en général marquée par une couche puissante d'argile d'où sortent des sources nombreuses et quelquefois très-abondantes. Les pâturages de la Normandie et les espèces d'oasis que l'on trouve sur les pentes des Cévennes sont presque tous placés sur les couches marneuses; l'humidité qui y règne continuellement est favorable à la végétation; le hêtre et le chêne y acquièrent des dimensions ordinairement inconnues aux pays calcaires. Ces marnes, si précieuses pour l'agriculture, le sont également pour l'industrie, car elles fournissent les matériaux très-propres à la fabrication des briques et de la chaux hydraulique.

Matériaux de construction fournis par le terrain jurassique.

Le terrain jurassique présente une succession de couches distribuées en quatre étages dont nous allons résumer les caractères. L'étage oolithique inférieur est le plus compliqué des quatre; on peut, en France, y établir jusqu'à cinq divisions; l'étage oolithique moyen en présente trois au plus, et l'étage oolithique supérieur semble ne former qu'un seul terrain. Les argiles sont très-abondantes dans les trois étages dont elles occupent les parties inférieures; chacun de ces étages argileux est caractérisé par la prédominance de fossiles particuliers, et pour ne citer que les huîtres, on voit que la *Gryphæa cymbium* caractérise le terrain des marnes et calcaires marneux, qui forment la base de l'étage oolithique inférieur, la *Gryphæa dilatata* l'oxford-clay, qui est à la base de l'étage oolithique moyen, et l'*Exogyra virgula* les couches d'argile de Kimmeridge, qui servent de base à l'étage oolithique supérieur. Quant au lias proprement dit, il est caractérisé par la présence de la *Gryphæa arcuata*.

Les calcaires de l'étage oolithique inférieur sont à petits grains, serrés, bien soudés entre eux, constituant des blocs d'une grande dimension, qui résistent fort bien aux intempéries de l'air et fournissent d'excellentes pierres de taille; il suffit de citer les célèbres

carrières ouvertes aux environs de Bayeux et de Caen, dans la grande oolithe dont on a extrait les pierres qui ont élevé Saint-Paul de Londres, et qui fournissent des pierres d'appareil exportées jusqu'à Anvers, pour les détails des ouvrages gothiques.

Dans l'étage oolithique moyen, le calcaire est ordinairement marneux, à gros grains irréguliers, peu cimentés et se délitant à l'air.

Nous avons vu aussi quels précieux gisements de ciment romain et de chaux hydraulique renferme le terrain jurassique, dans les divers étages de marnes et de calcaires marneux.

L'abondance et les excellentes qualités des pierres d'appareil que fournit le terrain jurassique ont déterminé la construction des villes, qui sont remarquables par la beauté de leurs habitations particulières et de quelques-uns de leurs édifices; on peut citer, entre autres, Besançon, Nancy, Metz, Dijon, Bourges, Poitiers, etc., et si l'on examine sur la carte géologique la position qu'occupent toutes ces villes, les mieux construites après les villes capitales, telles que Paris et Bordeaux, qui sont situées dans des bassins tertiaires, on remarque qu'elles sont toutes placées sur les contours des bandes jurassiques qui entourent le bassin parisien, en contournant le plateau central. Les Romains eux-mêmes, en choisissant les calcaires jurassiques pour la construction des monuments de Nîmes et du pont du Gard, ont fait preuve de l'expérience qu'ils avaient des bonnes qualités que présentent les matériaux fournis par ces terrains.

FORMATIONS CRÉTACÉES.

Les formations crétacées se sont immédiatement placées sur le quatrième étage du terrain jurassique dont le dépôt venait d'être suspendu par le soulèvement désigné sous le nom de *système de la Côte-d'Or* (direction E. 40° N. à O. 40° S.). Dans le bassin de Paris, elles sont spécialement caractérisées par un calcaire généralement pur, tendre et tachant les doigts, que l'on désigne sous le nom de *craie;* cette roche leur a donné son nom.

Le terrain crétacé peut se diviser en deux grands groupes qui admettent à leur tour des subdivisions dont le tableau suivant fait connaître les relations.

Formation crétacée.		*Système des Pyrénées.* — Direction E. 18° N. à O. 18° S.	
	(2) Terrain crétacé supérieur.	Craie de Maestricht :	Calcaire pisolithique.
		Craie blanche....	Couches avec silex. Couches sans silex. Craie marneuse.
		Système du Mont-Viso.—Direction N.N.O. à S.S.E.	
	(1) Terrain crétacé inférieur.	Grès vert..	Craie chloritée (craie tuffeau). Gault.
		Terrain néocomien (formation wealdienne).	
		Système de la Côte-d'Or. — Direction E. 40° N. à O. 40° S.	
		Terrain jurassique.	

TERRAIN CRÉTACÉ DE LA FRANCE.

Le terrain crétacé joue un rôle important dans la constitution géologique de la France ; à Paris, il forme le fond du bassin sur lequel se sont déposées les différentes assises des formations tertiaires qui en constituent le sol. Avant que le sol crétacé ait été recouvert par les matières qui composent les terrains tertiaires, sa surface présentait des enfoncements et des saillies qui y formaient des vallées, des collines ou des buttes. Ces inégalités sont indiquées par les îles et les promontoires de craie qui percent dans quelques points les terrains plus modernes, et par les excavations qu'on a faites dans ceux-ci et qui ont atteint la craie à des profondeurs très-variables.

De Paris, le terrain s'étend à l'ouest et à l'est, et constitue une zone continue qui se prolonge de l'autre côté de la Manche et en Angleterre.

Dans le midi de la France, le terrain crétacé forme un second bassin qui s'étend sur une longueur de 28 myriamètres environ, depuis l'embouchure de la Charente jusqu'aux bords du Lot, à une petite distance de Cahors ; sa largeur moyenne est de 60 à 65 kilomètres. Il occupe une grande partie des départements de la Charente-Inférieure, de la Charente, de la Dordogne, et pénètre dans celui du Lot.

Enfin, les formations crétacées recouvrent aussi des surfaces considérables dans les Alpes et les Pyrénées.

L'étude de ce terrain conduit à la distinction des deux bassins géologiques que l'on observe en Europe, le bassin de la Méditerranée, et celui de l'Océan. La séparation de ces deux bassins a lieu par la petite chaîne de terrain jurassique qui sépare les montagnes anciennes de la Vendée et celles du centre de la France, et qui court dans la direction de la Sèvre. Quand on marche vers le Nord ou vers le Midi, on rencontre le terrain crétacé ; mais ces dépôts, quoique appartenant à la même formation, ne sont pas mélangés. Il en résulte que le bassin du Midi s'est déposé dans une mer peuplée d'un certain nombre d'espèces qui n'habitaient pas la mer où se produisaient les couches du bassin du Nord, tandis que d'autres espèces communes aux deux mers servent à rétablir la continuité des dépôts dans les deux bassins.

Dans le bassin du Nord, la formation crétacée offre un ensemble continu ; mais dans le bassin du Midi les deux grands étages présentent une solution de continuité produite par le soulèvement du Mont-Viso ; l'étage supérieur prédomine dans le bassin du Nord, tandis que c'est le contraire dans le bassin du Midi.

Nous allons décrire les deux grands étages des formations crétacées.

1. — Terrain crétacé inférieur.

Terrain néocomien. — Les premières assises du terrain crétacé inférieur constituent le terrain néocomien, dont le nom rappelle que cette formation joue un rôle important dans la constitution géologique des environs de Neufchatel, où elle a été pour la première fois distinguée.

Dans les départements de la Haute-Marne et de l'Aube, on peut

observer quatre systèmes dans le terrain néocomien, ce sont :

(4) Argiles et sables bigarrés;
(3) Argiles ostréennes et lumachelles;
(2) Calcaire à spatangues;
(1) Sable ferrugineux de Vassy.

Le système (1) est formé de sables, tantôt purs, tantôt ferrugineux, qui sont quelquefois accompagnés d'un grès ferrugineux de fer oxydé en grains, exploité comme minerai de fer, par exemple, aux environs de Vassy (Haute-Marne). Ces sables ferrugineux sont recouverts par le système (2), composé d'un calcaire gris-jaunâtre, mélangé dans sa partie supérieure de marnes, et de sables argileux dans sa partie inférieure. Ce calcaire est exploité comme pierre à bâtir et fournit une bonne pierre à chaux hydraulique. On y trouve un grand nombre de fossiles dont l'abondance a fait donner au système (2) le nom de *calcaire à spatangues*. Le calcaire à spatangues est recouvert par une assise (3) composée d'une argile gris clair ou gris-bleuâtre, renfermant des calcaires très-durs et très-compactes, formant des dalles ou lits non continus et à diverses hauteurs dans l'argile; les nombreuses huîtres que renferment ces argiles ont fait donner à cette assise la dénomination d'*argiles ostréennes*. Ces argiles sont recouvertes par le système (4), composé de sables et d'argiles bigarrées de rouge, de vert et de gris, renfermant quelquefois des minerais de fer oolithique. Au-dessus de l'assise des argiles et sables bigarrés, on trouve une seconde assise de marne renfermant une grande quantité d'*Exogyra aquila* et qui, pour un grand nombre de géologues, complète la formation néocomienne.

Terrain du grès vert. — Le terrain du grès vert est, quand on le considère d'une manière générale, un terrain très-complexe composé d'une succession d'assises d'argiles, de marnes bleuâtres et de grès remplis très-souvent de matières vertes, de sables blancs-jaunâtres ou très-ferrugineux, et à la partie supérieure, d'assises de calcaire d'abord sableux, dans lesquelles la partie calcaire domine de plus en plus pour produire alors les couches de calcaire à grains verts (craie chloritée), et dont les assises les plus supérieures sont formées de calcaires argileux ou sableux, souvent assez compactes, dépourvus de grains verts, que l'on désigne sous le nom de *craie tuffeau*. En sorte que ce terrain peut être considéré comme formé de trois étages : d'abord celui du gault, l'étage de la craie chloritée passant à la craie tuffeau qui occupe la partie supérieure du terrain.

Les granites verts qu'on rencontre dans la craie chloritée ont été analysés par M. Berthier; il a trouvé que ceux de la craie chloritée du cap de la Hève, près le Havre, ont la composition suivante :

Silice	0,50
Protoxyde de fer	0,21
Alumine	0,07
Potasse	0,10
Eau	0,11
	0,99

Le terrain de grès vert représente à lui seul la formation crétacée

dans le sud-ouest de la France; il y présente trois assises que l'on peut désigner de la manière suivante :

(3) Calcaire jaune supérieur;

(2) Craie marneuse, craie tuffeau, craie grise, chloritée ou micacée;

(1) Calcaires blancs et calcaires gris-jaunâtres.

L'assise inférieure (1) est composée par des calcaires compactes et des couches de sable assez puissantes; on y rencontre beaucoup de rudistes et notamment le *Spheralites foliacea*, ainsi qu'une grande quantité de polypiers.

La seconde assise (2) forme une zone qui court du nord-ouest au sud-est; elle présente une continuité remarquable; mais ses caractères varient avec l'épaisseur de cette bande qui n'a que 7 à 8 mètres dans le département du Lot, et qui en acquiert jusqu'à 130 dans les environs de Sarlat dans la Dordogne. Elle passe de l'état sableux à des calcaires semi-cristallins, grenus ou compactes, qui renferment presque toujours encore des grains quartzeux. Dans quelques circonstances, elle contient de véritables couches de grès calcaires chargées d'une certaine quantité de paillettes de mica. Quand cette assise possède une puissance considérable, elle est alors remarquable par la régularité de sa stratification et par l'homogénéité de la roche qui fournit des pierres d'appareil meilleures qu'en aucun autre endroit. Dans les départements de la Charente et de la Charente-Inférieure, la structure schistoïde de cette assise est presque générale.

Les calcaires jaunes supérieurs qui forment l'assise la plus élevée du terrain sont souvent recouverts par les terrains tertiaires moyens, qui forment un vaste manteau sur la France, et s'étendent depuis le bassin de Paris jusqu'à celui de Bordeaux, d'une manière presque continue. Cette assise supérieure est celle dont les caractères sont les plus simples et les plus uniformes. Les calcaires qui la composent sont, en général, peu solides, souvent formés de parties cristallines et terreuses; ils contiennent, en outre, du sable quartzeux très-fin, du mica argentin et des points verts, dont l'ensemble rappelle la craie chloritée du cap de Hève et de Rouen. Cet étage est un des plus étendus des trois qui composent le terrain; sa limite avec les terrains tertiaires est marquée par une crête saillante qui forme une espèce de falaise élevée. C'est principalement dans cet étage que l'on rencontre un grand nombre de rudistes, fossiles remarquables qui impriment au terrain crétacé du Midi un caractère paléontologique particulier qui le sépare nettement du bassin crétacé du Nord. Quand on se rapproche de l'Océan, les assises supérieures du terrain diminuent de puissance, et disparaissent même, pour la plupart, avant d'atteindre la côte. Les calcaires à rudistes, les sables, les grès de la troisième assise persistent au contraire et s'y voient sur une épaisseur totale qui ne dépasse pas 25 mètres. En outre, la puissance des différentes assises est précisément en sens contraire de leurs distances à la mer actuelle. L'amincissement des différents étages de la craie en avançant vers la mer, empêche d'avoir une opinion précise sur la puissance totale de cette formation qui, à en juger par l'épaisseur de chacune des trois assises isolées, serait environ de 350 mètres.

La craie chloritée supérieure (craie tuffeau) est, en général, un calcaire très-argileux, mélangé de points verts; elle contient quelquefois des parties égales de calcaire et d'argile; elle se délite alors aisément, ce qui la rend propre à marner les terres. Elle est l'objet d'exploitations importantes dans la Champagne et dans la Beauce. Elle fournit des pierres gélives d'un mauvais usage pour les constructions, mais elles donnent d'excellentes pouzzolanes calcaires, ainsi que l'a découvert M. Minard.

2. — Terrain crétacé supérieur.

Craie blanche. — Le terrain de craie blanche joue un grand rôle dans le bassin du nord de la France. Dans les environs de Paris, la craie est recouverte par les terrains tertiaires; en Champagne, elle forme le sol; elle lui imprime une telle stérilité, qu'on y voit des plaines immenses non-seulement privées de culture, mais encore arides et absolument dénuées de végétation, excepté dans quelques parties très-circonscrites où des lambeaux de terrain tertiaire forment des espèces d'îles ou d'oasis au milieu de ces déserts. Il est telle partie de ces plaines de craie qui, depuis des siècles, n'a peut-être été visitée par aucun être vivant; nul motif ne peut les y amener, aucun végétal n'y appelle les animaux; par conséquent ni la culture ni la chasse n'y peuvent attirer les hommes. On fera remarquer à cette occasion que l'argile et la craie pure sont les seules sortes de terrains qui soient absolument impropres à la végétation. Plusieurs espèces de plantes peuvent être cultivées dans les sables les plus arides si l'on parvient à les fixer; mais on ne connaît, jusqu'à présent, aucun moyen de défricher en grand ni l'argile ni la craie. Heureusement cette sorte de terrain est ordinairement recouverte d'argile, de silex, de sable ou de calcaire grossier qui, par leur mélange en diverses proportions, forment des terres propres aux différents genres de culture.

La craie est le plus souvent, dans sa partie supérieure, à l'état d'un calcaire tendre, pulvérulent, propre à faire du blanc d'Espagne et de la chaux; on y trouve aussi des silex, principalement dans les parties supérieures. Elle contient quelquefois des blocs de calcaire cristallin, quelquefois aussi elle passe à un calcaire compacte, à cassure conchoïde; dans sa partie inférieure, le dépôt perd de son uniformité, se mélange avec des sables ou de l'argile; alors la craie devient marneuse : ce sont ces différences qui font subdiviser le terrain de craie blanche en couches avec silex, couches sans silex et craie marneuse.

La vallée de la Seine offre un des meilleurs exemples de craie blanche, depuis Paris jusqu'à quelques lieues avant Rouen; les escarpements assez nombreux qu'on y observe permettent d'en faire une étude détaillée. Il existe également des carrières intéressantes au pied de la colline de Meudon, près Paris; la craie n'y présente aucune assise continue; elle y constitue d'immenses dépôts formant dans quelques points, mais principalement sur les limites du bassin de Paris, des collines entières, des plateaux étendus et des buttes dont l'élévation passe quelquefois 100 mètres. On n'y remarque distinctement aucune assise continue ou régulière appartenant à la masse même; c'est-à-dire qu'on n'y voit pas ces couches séparées nettement par

des fissures de stratification parallèles qui sont si distinctes dans les calcaires des formations jurassiques. Cependant des lits de pierres à fusil ou silex noirs très-multipliés, et souvent assez rapprochés les uns des autres, annoncent qu'elle est le résultat d'un dépôt tranquille. La distance générale qui sépare ces lits est, à Meudon, d'environ 2 mètres; à Bougival, près Paris, elle est plus grande et les silex sont moins nombreux.

On ne trouve dans la craie de Paris aucun gîte métallique d'une quantité et d'une étendue notables; le seul métal qui s'y rencontre, c'est le fer à l'état de sulfure ou de pyrites globuleuses, soit disséminées, soit incrustant les débris des corps organisés qui s'y rencontrent. Ces débris organisés fournissent le caractère le plus essentiel et le plus certain de la craie.

La craie blanche peut être observée dans un grand nombre de points de l'Europe : en Angleterre, dans le bassin du nord de la France, en Allemagne, dans la Crimée et dans une partie de la Russie, et dans l'État de New-Jersey (Amérique du Nord). Dans toutes ces contrées, la craie renferme constamment un certain nombre d'espèces fossiles qui peuvent être considérées comme caractéristiques de cette formation; tels sont, par exemple, les *Belemnites mucronatus, Ostrea vesicularis, etc.*

Craie de Maëstricht et calcaire pisolithique. — La craie blanche est recouverte à Ciply, près de Mons, et surtout à Maëstricht, par une formation composée d'un calcaire sableux jaunâtre, exploité comme pierre à bâtir et contenant des lits de rognons de silex de couleur claire, différant sous ce rapport des silex pyromaques noirs de Meudon. C'est dans ces terrains et dans les carrières de la montagne de Saint-Pierre, près de Maëstricht, que l'on a découvert la tête de cet immense saurien, le *Mosasaurus*, connu sous le nom de *grand animal* de Maëstricht.

Dans le bassin de Paris, à la partie supérieure de la craie blanche, on rencontre souvent un calcaire particulier, qui a été désigné sous le nom de *calcaire pisolithique*. On peut observer ce terrain à Meudon, par exemple; il est formé par un calcaire jaunâtre, peu solide, composé de petits grains et de petits fragments de corps marins faiblement agglutinés, à l'exception de quelques parties plus dures qui forment dans le milieu de la masse des tubercules irréguliers. Le calcaire pisolithique occupe une position géologique entièrement comparable à celle que présente la craie de Maëstricht par rapport à la craie blanche; il représente l'étage de la craie de Maëstricht dans le bassin parisien.

Terrain crétacé d'Angleterre.

A la partie supérieure du terrain crétacé de l'Angleterre, on trouve une formation d'eau douce, désignée sous le nom général de *terrain wealdien*, parce que ce terrain constitue la contrée de Wealden dans le Sussex. Ce terrain peut être divisé en trois assises :

Terrain wealdien.......	(3) Argile de Weald.
	(2) Sable de Hastings.
	(1) Calcaire de Purbeck.

Le calcaire de Purbeck (1) est une espèce de lumachelle presque entièrement formée de coquilles brisées. On l'exploite comme pierre à bâtir et comme marbre. Ce calcaire est recouvert par une formation arénacée (2), composée de sables ordinairement ferrugineux, passant tantôt au grès ferrugineux, tantôt au grès calcarifère. De nombreux restes d'animaux vertébrés, parmi lesquels on a reconnu les ossements de reptiles gigantesques, se rencontrent dans les sables de Hastings.

L'argile de Weald (3), qui forme l'assise supérieure du terrain, est grise, noirâtre, schistoïde, sableuse à sa base; elle renferme des bancs subordonnés de calcaire criblé de débris de coquilles. Les principaux fossiles qu'on y rencontre sont d'eau douce. La présence d'un grand nombre d'animaux d'eau douce et terrestres mélangés avec un petit nombre de coquilles marines et d'ossements de sauriens roulés, démontrent que le terrain wealdien s'est produit à l'embouchure d'un grand fleuve et non pas dans un lac.

On a retrouvé le terrain wealdien en France entre le Jura et les Alpes; M. Coquand a rapporté à l'horizon de l'argile de Weald, certaines couches d'argile que l'on rencontre au-dessous du terrain de grès vert dans quelques points du département de la Charente.

Matériaux de construction du terrain crétacé.

La craie du bassin du nord de la France, calcaire tendre, pulvérulent, tachant les doigts, n'est exploitée que pour la fabrication du blanc d'Espagne et de la chaux. Dans les carrières de Meudon, on exploite la craie que l'on mélange avec l'argile plastique pour la fabrication de la chaux hydraulique. Le terrain de grès vert fournit des pierres d'appareil peu solides et peu durables, mais qui sont employées avec avantage dans les contrées où existent ces formations, parce que leur extraction est peu coûteuse et qu'on peut les tailler, les scier avec une grande facilité. D'ailleurs ces calcaires, si tendres à la sortie des carrières, acquièrent une solidité suffisante pour les constructions ordinaires, quand ils ont été exposés un certain temps à l'air. Ces qualités ont été mises à profit dans les contrées crétacées, et les villes d'Orléans, de Saumur, d'Angoulême et de Tours doivent l'élégance de leurs constructions à la facilité que l'on a de tailler les calcaires de la craie tuffeau.

Les couches argileuses du Gault fournissent en un grand nombre d'endroits des argiles très-recherchées pour la fabrication des briques et des tuiles.

Le terrain crétacé de la Provence contient des couches calcaires très-dures qui fourniraient d'excellents matériaux, si ces roches n'étaient pas habituellement très-fendillées.

TERRAINS TERTIAIRES.

Le soulèvement de la chaîne des Pyrénées, dont la direction court de l'O. 18° N. à l'E. 18° S., a terminé la période crétacée, et de nouveaux sédiments sont venus produire les terrains tertiaires.

Dans ces formations, les couches sont moins continues que celles des terrains antérieurs, en sorte qu'on n'observe pas cette identité de

de gypse considérables dans sa partie inférieure, et des meulières dans sa partie supérieure.

Quand on l'étudie dans toute l'étendue du bassin parisien, on est conduit à y établir les subdivisions suivantes :

Terrain des marnes gypseuses.	(5) Argile et meulière.
	(4) Calcaire siliceux.
	(3) Marnes vertes.
	(2) Gypse et marnes gypseuses.
	(1) Marnes et calcaires d'eau douce de Saint-Ouen.

La partie inférieure du terrain est formée par un système (1) de couches de marnes et de calcaires marneux que l'on peut observer autour de Paris, à Saint-Ouen, à la Villette, et dans la plaine qui supporte la butte de Montmartre. Le calcaire est blanchâtre et présente une structure compacte; il renferme des coquilles d'eau douce; on y rencontre différentes variétés de silex et principalement du quartz nectique : les marnes qui accompagnent le calcaire sont blanchâtres, souvent très-feuilletées et happant fortement à la langue.

L'étage des marnes et calcaires de Saint-Ouen est recouvert par les marnes gypseuses (2) proprement dites. Cette formation (2), considérée dans son ensemble, se compose d'une série de couches de marnes renfermant des masses subordonnées de gypse. Les amas de gypse, dont l'épaisseur est ordinairement de 5 à 8 mètres, mais qui s'élève quelquefois à 40 mètres, ne se présentent pas en couches régulières à surfaces parallèles : ce sont au contraire de vastes lentilles discontinues intercalées dans les marnes. Les masses de gypse sont renfermées dans une série de petites collines allongées, souvent séparées les unes des autres, et qui se dirigent généralement dans le sens de l'est à l'ouest : le gypse s'est déposé dans de faibles dépressions préexistantes du sol recouvert par les eaux, qui étaient circonscrites et sans communications les unes avec les autres. De nouvelles couches de marnes étant ensuite venues recouvrir le gypse, les amas se sont trouvés enveloppés de toutes parts et parfaitement isolés les uns des autres.

Le gypse est ordinairement d'un blanc jaunâtre, sa texture est saccharoïde; il est aussi dans certaines assises cristallisé en fers de lance, quelquefois très-allongés. Il est toujours mélangé de calcaire, circonstance qui communique au plâtre de Paris les qualités précieuses qui en rendent l'emploi si général dans les constructions.

Terrains tertiaires moyens.

Les terrains tertiaires moyens sont composés de trois étages :

(3) Étage des fahluns.
(2) Étage du calcaire d'eau douce et des meulières.
(1) Étage des sables et grès de Fontainebleau.

Les deux inférieurs (1) et (2) peuvent être étudiés dans le bassin de Paris.

1°. Terrain des grès et sables de Fontainebleau. — La partie inférieure de ce terrain est formée par des couches marneuses, renfermant des bancs d'huîtres et qui, sous le nom de *marnes marines*, ont été long-

temps réunies au groupe de calcaires et marnes d'eau douce sur lesquels elles reposent. A Montmartre, ces marnes sont caractérisées par une grande quantité d'huîtres et par d'autres fossiles dont on ne rencontre que les moules.

Les marnes marines sont recouvertes par une formation sableuse à la partie inférieure de laquelle on rencontre, par exemple à Romainville, un grès coquillier assez dur dans lequel toutes les coquilles ne sont qu'à l'état de moules et d'empreintes. On peut voir à la descente de Longjumeau le banc coquillier reposer immédiatement sur les marnes à huîtres. Ce banc devient souvent sableux, et alors les nombreux fossiles qu'il renferme sont libres dans la marne sableuse, quoique très-fragiles.

2°. Calcaires d'eau douce et meulières. — Le terrain marin de sables et grès de Fontainebleau est recouvert par une formation d'eau douce dont les caractères sont très-variables quand on passe du nord au sud. Cette formation se compose d'un calcaire d'eau douce avec des argiles et des meulières qui semblent n'en être qu'une modification, quoique les circonstances de leur gisement soient un peu différentes. Quand les deux assises existent en un même point, les calcaires ou les marnes d'eau douce sont toujours inférieurs aux argiles avec meulières. Ce calcaire d'eau douce forme une portion considérable du sol de la Beauce, contrée remarquable par la culture des céréales.

Dans les environs de Paris, ce calcaire est blanc ou d'un gris jaunâtre; il est tantôt tendre et friable comme de la marne, tantôt compacte, solide, à grains fins et à cassure conchoïde. Quoique dans ce dernier cas il soit assez dur, il se brise facilement et éclate en fragments à bords aigus, à la manière du silex, en sorte qu'il ne peut se laisser tailler. Ces caractères n'appartiennent qu'au calcaire d'eau douce qui est immédiatement aux environs de Paris, car, à une plus grande distance de la capitale, on trouve du calcaire d'eau douce très-compacte, d'un gris brun, qui se laisse très-bien tailler et polir, et fournit de bonnes pierres de construction, malgré les infiltrations calcaires qui l'ont pénétré et qui n'ont pas entièrement rempli les cavités. Le calcaire de Château-Landon, qui est en bancs extrêmement puissants, appartient à ce terrain calcaire d'eau douce. Dans le centre de la France, il fournit de belles pierres de construction. Le pont de Saint-Florent, près Bourges, a été construit avec un calcaire d'eau douce de cet étage.

3°. Des fahluns. — La partie supérieure des terrains tertiaires moyens dans le bassin de la Loire est formée par un terrain particulier désigné sous le nom de *fahluns*.

Les fahluns sont des dépôts marins composés ordinairement de coquilles et de polypiers brisés, mélangés d'une certaine quantité de sable siliceux à grains plus ou moins gros. La roche est le plus souvent meuble, mais quelquefois elle est plus ou moins agglutinée par un ciment calcaire, et devient alors une roche tendre, poreuse, à texture très-grossière. Ces dépôts sont généralement peu étendus : dans la Bretagne ils occupent des dépressions à la surface des terrains cristallins et paléozoïques. On peut étudier ces terrains aux environs de Dinan, autour de Rennes et dans la Mayenne. Dans la Touraine,

ils s'appuient sur la formation du calcaire d'eau douce qui s'est déposée immédiatement avant eux.

Terrain tertiaire supérieur.

Le bassin de Paris, à l'exception de quelques sommités de la Normandie, ne paraît pas renfermer de terrain tertiaire supérieur. Il est au contraire fort abondant dans le midi de la France : tantôt il se présente sous la forme de couches de galets de sables, ou de fragments anguleux recouvrant les plateaux de formation plus ancienne : les alluvions plus anciennes de la Bresse et la vaste plaine sablonneuse des Landes appartiennent à ce terrain; tantôt ce sont des argiles sableuses contenant de nombreux fossiles marins, comme cela a lieu à Asti et dans les collines subapennines. La première manière d'être est la plus fréquente, mais on rencontre la seconde dans les environs de Perpignan. Le terrain tertiaire supérieur forme dans cette localité quelques dépôts très-circonscrits de sables argileux mêlés de coquilles fossiles analogues aux terrains tertiaires subapennins. Ces lambeaux tertiaires sont recouverts par des terrains d'alluvion, et ils sont séparés du calcaire d'eau douce par une plaine de plusieurs lieues : on n'est parvenu à déterminer leur âge géologique que par l'étude des fossiles, qui a démontré l'identité qui existe entre la faune de ces dépôts et celle des sables subapennins d'Asti. Les coquilles, qui sont toutes marines, sont disséminées irrégulièrement au milieu d'une argile sablonneuse, endurcie en quelques points par des filtrations calcaires et ferrugineuses. Le plus ordinairement les argiles se délitent à l'air, et le test des coquilles devient alors très-friable. Les couches de ces terrains sont inclinées; on voit qu'elles ont participé au soulèvement des ophites, lequel a donné au caingon sa forme générale. Dans le département de la Haute-Loire, le terrain tertiaire supérieur affecte les caractères d'un terrain d'alluvion; il contient des galets de granite, de gneiss, et une grande quantité de débris volcaniques. La masse même de ces terrains est formée de fragments volcaniques à tous les états. Tantôt ils constituent des galets arrondis qui portent l'empreinte ineffaçable du mouvement en quelque sorte irrégulier des eaux ; tantôt ils sont en fragments de toutes les formes, à angles vifs et quelquefois légèrement arrondis. Ces blocs, de grosseur variable, et dont un grand nombre ont plusieurs mètres cubes, sont enveloppés dans une pâte de couleur blanchâtre ou gris clair, composée entièrement de débris de roches ponceuses et trachytiques.

Matériaux de construction des terrains tertiaires.

Les terrains tertiaires présentent des matériaux de construction extrêmement variés. On y rencontre des calcaires tantôt assez tendres pour que la taille soit facile et qui offrent très-souvent une résistance suffisante pour être employés dans les constructions importantes; quelquefois les calcaires sont fort durs et divisés en bancs assez minces; ils sont alors avantageusement exploités pour le dallage : quand les calcaires sont marneux, ils peuvent donner des chaux hydrauliques.

Les calcaires d'eau douce généralement siliceux que renferment les

formations tertiaires sont souvent susceptibles, par leur compacité, de recevoir les détails les plus fins de la sculpture : aussi sont-ils employés pour la construction de monuments importants. L'arc de triomphe de l'Étoile a été construit avec le calcaire d'eau douce de Château-Landon.

Le calcaire siliceux fournit aussi quelquefois de bonne chaux hydraulique.

On trouve encore dans les terrains tertiaires des argiles très-pures, fort recherchées pour les poteries, les faïences, et des argiles communes employées pour les briques. On se sert aussi à Meudon de l'argile plastique, en la mélangeant avec la craie blanche, pour fabriquer de la chaux hydraulique artificielle.

On y trouve aussi des sables quartzeux très-purs, recherchés pour les verreries.

Des gisements très-importants de pierre à plâtre sont exploités dans ces terrains; on en retire aussi des lignites. Ces terrains fournissent des grès siliceux fort durs qui servent au pavage de Paris, et des meulières employées avantageusement dans les constructions qui réclament une pierre capable de résister à la fois au choc et à l'humidité.

Les formations tertiaires moyennes renferment souvent des sables marins calcaires et argileux qui jouent un grand rôle dans l'amendement des terres de certaines contrées de la France.

Les terrains tertiaires constituent presque partout des contrées peu élevées et peu accidentées, traversées souvent par des vallées larges et unies, dans lesquelles serpentent des fleuves navigables. La grande quantité de matériaux qu'ils recèlent dans leurs couches rendent les contrées tertiaires très-favorables au développement des grands centres de population : aussi presque toutes les grandes capitales de l'Europe se sont-elles développées sur des terrains tertiaires. Paris, Londres, Bruxelles, Bordeaux et Marseille témoignent de la vérité de cette observation.

TERRAIN DILUVIEN.

Les rivières déposent journellement des sables et des limons, soit dans leur trajet ordinaire, soit dans les inondations; elles agrandissent et modifient les deltas qui se trouvent à l'embouchure des grands fleuves; enfin tantôt elles dégradent, tantôt elles obstruent de leurs dépôts les vallées qu'elles parcourent; ces dépôts journaliers, dont l'épaisseur, à peine appréciable d'abord, peut croître et atteindre avec le temps une valeur considérable, constituent ce qu'on nomme spécialement *terrain d'alluvion*.

Pendant la période de tranquillité de la terre, les mers n'étant soumises qu'aux faibles oscillations du flux et du reflux, les rivières restant encaissées dans le lit qui les mène au réservoir commun, ne laissent que des traces peu sensibles de leur passage. Mais lorsqu'il est survenu une révolution qui a ébranlé l'écorce solide du globe et bouleversé sa surface, les mers ont alors abandonné brusquement leurs bassins; elles ont cherché les dépressions du nouveau sol, elles s'y sont portées violemment, entraînant avec elles les débris de roches

qui se sont trouvées sur leur passage; tous ces débris, que le mouvement des vagues a pu maintenir partiellement au sein de la masse liquide, se sont disposés en masse aussitôt que l'état d'équilibre s'est rétabli, et ce sont ces dépôts qui sont devenus la base des couches sédimentaires des formations.

Le terrain de transport qui s'est formé après la dernière révolution du globe a reçu le nom de *diluvium*.

Le terrain diluvien, que l'on confond souvent avec le terrain alluvial, bien qu'ils soient dus à des phénomènes distincts, est composé de matières meubles, formées de fragments de volume très-variable; on y rencontre des débris d'êtres organisés antérieurs à ceux de l'époque actuelle; ils se rapprochent par le genre de ceux qui peuplent aujourd'hui la terre, mais toutes les espèces en sont différentes; les terrains d'alluvion, dont la formation se continue, renferment au contraire des restes des êtres organisés qui meurent chaque jour, et c'est dans ces terrains seuls qu'on rencontre des dépouilles humaines.

Les terrains diluviens occupent tantôt des vallées, tantôt ils recouvrent la surface de plateaux élevés. Quelquefois le terrain diluvien est représenté par des dépôts dont les éléments très-ténus sont argileux ou sableux, et très-souvent, au contraire, il est presque entièrement composé de cailloux roulés qui sont souvent très-gros.

Le sol de la vallée de la Seine est formé par le diluvium. Les sables qui composent ce terrain de transport sont granitiques, ou plutôt produits par la trituration du quartz et du feldspath. Les sables proviennent des débris des montagnes du Morvan; leur origine ne peut être contestée, quand on retrouve dans des galets un peu volumineux tous les caractères des granites qui constituent ces montagnes. Les plateaux qui couronnent la vallée de la Seine sont recouverts aussi par une couche de diluvium, qui s'était déjà déposée avant l'ouverture de la vallée de la Seine. Ce diluvium des plateaux a été désigné par M. Elie de Beaumont sous le nom de *diluvium scandinave*, celui de la vallée étant le diluvium alpin.

Des Dunes. — Les côtes sont souvent bordées par de petites montagnes de sable que l'on appelle des *dunes*. Leur formation est le résultat d'un phénomène général, mais qui ne se produit que dans des circonstances déterminées. Quand le fond de la mer est formé de sable, et qu'en même temps la plage est faiblement inclinée, si la mer est sujette aux flux et aux reflux, le sable se trouve à découvert pendant que la mer est basse; alors le vent qui souffle de la mer peut entraîner le sable vers le rivage. Ainsi lancé par le vent, ce sable a bientôt franchi et même comblé l'espace qui sépare le banc de sable de la côte. Quand la côte est verticale, le sable reste accumulé au pied des rochers, il n'en résulte rien de remarquable; mais quand la côte est basse, il se produit des accumulations de sables qui s'élèvent sous la forme de monticules, dont le pied est situé à la limite des plus hautes marées : ce sont les dunes.

La partie des côtes de France où les dunes sont le plus remarquables est la côte des Landes de Gascogne. A partir de la pointe de Grave qui resserre l'embouchure de la Gironde, en face de la tour de Cordouan, s'étend vers le sud une côte très-unie, présentant peu de

découpures jusqu'à l'entrée du bassin d'Arcachon, et qui continue ensuite de la même manière jusqu'à l'embouchure de l'Adour et aux falaises de Biaritz. Toute cette côte est bordée de dunes, qui forment une bande d'une assez grande largeur. Au nord et au sud de la Teste de Buch, la bande des dunes est de 4 à 6 kilomètres de largeur; mais sa largeur moyenne est de 6 à 8 kilomètres.

Des plages de sable et des levées de galets. — Lorsqu'en approchant du rivage la profondeur devient assez petite pour que le mouvement des vagues commence à être gêné, les molécules d'eau ne pouvant continuer à transmettre leur vitesse dans l'intérieur du fluide, l'agitation se concentre près de la surface; les vagues s'élèvent davantage, et finissent même par se déchirer, par se briser en s'élançant plus haut sur le rivage, qu'elles ne le font au large. Il résulte de ce phénomène un mouvement assez compliqué des eaux sur la plage; le résultat de ce mouvement est que la mer rejette de son sein une certaine quantité de matières qui forment une espèce de talus, de levée, présentant le profil qui convient le mieux au mouvement des eaux.

Par la manière même dont les vagues brisent, la mer aurait, sur un rivage presque plat, plus de tendance à rejeter vers l'extérieur les objets qu'elle agite qu'à les ramener vers l'intérieur; mais elle donne à son fond, près du bord, une inclinaison qui ne devient fixe que lorsque les efforts opposés s'y compensent, et sur laquelle par conséquent elle n'a pas plus de tendance à rejeter vers l'extérieur qu'à ramener vers l'intérieur. L'inclinaison du talus ainsi formé va en augmentant jusqu'à la partie supérieure, comme le montre la *fig.* 20, *Pl. VII.* La mer a plus de tendance à rejeter les grosses particules que les petites; elle repousse donc d'abord les gros galets, puis les petits et enfin le sable.

Quand il n'y a pas de galets, la mer entasse des levées de sable, et lorsque ce sable est fin, il donne naissance à des dunes.

Le bourrelet de matières meubles que la mer élève sur ses bords a été désigné, par M. Elie de Beaumont, sous le nom de *cordon littoral;* il a en outre appelé *appareil littoral* les dunes et le cordon littoral réunis.

Des barres. — Les barres sont encore un produit naturel des eaux de la mer. Le fait de l'existence d'une barre à l'entrée d'un grand nombre de rivières est un des plus notoires parmi ceux auxquels la navigation est subordonnée; c'est un grand fait naturel, qui témoigne des changements de régime que les eaux éprouvent en s'éloignant des larges espaces ouverts et profonds qui sont les centres d'agitation de la surface de la mer. Les localités privilégiées où ce changement de régime, cet amoindrissement de l'agitation, n'a pas amené d'ensablement sont fort rares. Ce sont les ports par excellence : Rochefort, Brest, Plymouth, Portsmouth, Londres, Anvers, en sont des exemples.

C'est à l'entrée des rivières qu'on a le plus d'occasions d'observer les barres. En général, la mer obstrue les entrées des rivières, et celles-ci ont une profondeur assez considérable à une certaine distance de leur embouchure. En se rapprochant de la mer, il y a un endroit

moins profond ; c'est cet endroit qu'on appelle la *barre*. En dedans de la barre on est en rivière, en dehors on est en mer. La rade est en dehors, le port est en dedans. La question difficile pour entrer en rivière n'est pas de franchir un endroit plus étroit, mais de passer l'endroit où les matières s'entassent et où la mer brise avec plus de force. Les matières ainsi entassées ne laissent que le vide nécessaire pour donner passage à la rivière. Si elles s'entassaient plus haut, les eaux seraient arrêtées, et il se produirait une écluse de chasse naturelle ; c'est là ce qui limite la hauteur de la barre. Il est rare que sur une barre il y ait plus de 6 mètres d'eau à basse mer, il y en a généralement beaucoup moins.

Quelquefois, par suite de circonstances locales, le cordon ne se forme pas, et la barre peut devenir un ensablement très-long : l'Elbe et la Seine en offrent des exemples ; mais le plus souvent il est très-court.

TERRAINS VOLCANIQUES.

Les terrains volcaniques sont dus, comme les terrains cristallisés (granites, porphyres, etc.), à un épanchement de matières fondues ; mais, outre la différence entre la nature des roches qui les composent et leur texture, il en existe une très-importante dans le phénomène qui a produit les volcans, en ce sens qu'il n'a agi que sur des points isolés, tandis que la production des granites, par exemple, est le résultat d'une cause plus générale.

Les terrains volcaniques les plus anciens ne paraissent pas remonter au delà du terrain tertiaire moyen. On divise ces terrains en trois classes, qui sont, par ordre d'ancienneté :

1°. Les trachytes ;
2°. Les basaltes ;
3°. Les laves.

On rencontre souvent les trois genres de roches dans les mêmes localités.

Le terrain basaltique est, en France, le plus développé des trois ordres de terrains volcaniques ; il se présente constamment associé avec les trachytes. Ses filons traversent les masses trachytiques dans toutes les directions, et se répandent ensuite en nappes sur leur surface. On observe cette disposition au Mezène et au Mont-Dore ; mais elle est surtout remarquable au Cantal. Le basalte s'étend en longues nappes sur les terrains granitiques et sur les terrains stratifiés même les plus modernes. Les collines de calcaire d'eau douce des environs de Clermont offrent de beaux exemples de cette disposition ; elles sont constamment couronnées par des chapeaux basaltiques qui se correspondent, et paraissent pour la plupart appartenir à la même coulée. La position de ces couches volcaniques, qui tantôt descendent dans les vallées, tantôt, au contraire, participent aux mêmes découpures que les coteaux, est un des faits les plus intéressants pour leur histoire. Il nous apprend qu'il y a des basaltes de plusieurs âges, et que les plus anciens sont arrivés au jour avant que le sol tertiaire ait été dénudé, tandis que les plus modernes se sont épanchés depuis l'ouverture des vallées de la Limagne.

Outre ces deux manières d'être, le basalte forme encore des cônes isolés, dispersés, soit sur le terrain ancien, comme dans le Forez; soit sur les terrains secondaires, comme dans les environs de Lodève et de Montpellier. Il présente alors des scories, et se rapproche par ses caractères des laves des volcans modernes. Les émissions basaltiques ont donc embrassé une période étendue, dont les premières phases remontent jusqu'au terrain trachytique, tandis que les dernières se lient d'une manière intime aux phénomènes volcaniques modernes. Les volcans basaltiques à cratère ont agi pendant une période fort longue, ils ont acquis un grand développement dans les environs de Clermont, où ils constituent une longue chaîne de cratères distincts qui s'étendent du nord au sud sur 60 kilomètres environ, depuis Cambroude jusqu'au delà de Besse.

L'action volcanique n'a pas eu seulement pour résultat l'entassement successif des produits ignés de ces diverses époques; leur émission a été souvent accompagnée de modifications importantes dans la configuration du sol et d'altération dans la nature des roches.

Le Mont-Dore et le Cantal offrent des exemples, sur une grande échelle, de l'altération du relief du sol par l'action volcanique; il est vrai que la lave soulevante n'apparaît pas, et que la cause n'est pas développée au centre même du cratère; sous ce rapport, le Mezène est peut-être préférable à citer; le cirque de la Croix-des-Bouttières présente tous les caractères d'un cratère de soulèvement, et la position des roches basaltiques, par rapport aux phonolithes et aux trachytes qui forment la masse principale, prouve que cette configuration du sol est due à leur émission; on trouve, en outre, vers le centre des restes de l'action volcanique.

Dans le Cantal, le calcaire d'eau douce, qui forme un petit bassin à Aurillac, est porté à des hauteurs bien supérieures à son niveau naturel; on en trouve dans la montée du Livran presque jusqu'aux deux tiers de sa hauteur. La position inclinée des couches de calcaire et de silex confirme le déplacement de ces masses calcaires et leur élévation par l'action volcanique.

Le mode de formation des anciens terrains volcaniques a pu se déduire tout naturellement de l'observation des volcans encore en activité. Or voici ce que présente une éruption du Vésuve.

Sous l'influence de la pression intérieure, il se forme une cloche aux dépens du terrain préexistant, puis la cloche s'ouvre dans le milieu pour donner passage à la lave en fusion. Celle-ci ne s'accumule pas sur les bords, ni sur le pourtour du cratère; elle s'écoule en raison de sa fluidité, et sillonne même la surface qu'elle parcourt en entraînant avec elle les débris du sillon. Ce n'est que lorsque l'inclinaison du terrain n'est plus que de 4 degrés que la partie extérieure de la lave commence à se solidifier en formant une espèce de manchon, sous lequel la partie liquide continue à marcher jusqu'à ce qu'elle arrive sur un terrain à peu près horizontal. Chacune de ces coulées de lave est très-étroite, les produits en sont caverneux et tiraillés, à moins que, par des circonstances locales et accidentelles, la lave n'ait pu s'accumuler sur une grande épaisseur, auquel cas elle présente une texture compacte et souvent cristallisée.

Cette relation entre la texture des laves et le relief de la surface sur laquelle elles s'épanchent, est un des faits les plus importants pour l'étude des volcans anciens; il en résulte d'une manière certaine que lorsque des nappes de trachytes ou de basaltes se présentent sous des angles supérieurs à trois ou quatre degrés, elles ne se sont pas solidifiées sous cette inclinaison; mais qu'épanchées horizontalement, elles ont été relevées par une action postérieure.

1°. Terrain trachytique. — Le terrain trachytique peut être observé dans un grand nombre de points de l'Europe. Il constitue en Auvergne le Puy-de-Dôme, le Mont-Dore, le Cantal, ainsi que le Mezène, sur la limite du Velay et du Vivarais. On le retrouve dans les environs de Naples, aux îles de Lipari, dans les monts Euganéens; il forme le groupe des Siebengebirge, sur la rive droite du Rhin, et il joue un grand rôle dans la Hongrie.

Les roches qui composent les terrains trachytiques sont très-variées; elles sont généralement rudes au toucher, souvent finement poreuses; quelques-unes sont tout à fait compactes, et d'autres porphyroïdes. On trouve aussi dans ces terrains des obsidiennes et des perlites, puis des conglomérats composés de blocs ou de fragments scoriacés, liés par des pâtes poreuses, compactes ou vitreuses. Ces conglomérats forment quelquefois des couches qui alternent plusieurs fois de suite avec des nappes de trachytes cristallins; quelquefois aussi, autour des montagnes trachytiques, ces conglomérats, réduits à des matières pulvérulentes, ponceuses, et renfermant des fragments tantôt anguleux et tantôt roulés de trachytes, et souvent même aussi des coquilles marines, forment de vastes dépôts qui ont été stratifiés par les eaux.

2°. Terrains basaltiques. — Les basaltes sont des roches généralement noires ou d'un bleu foncé; on reconnaît à la loupe qu'elles sont formées de très-petits cristaux de pyroxène et de labrador. Le premier de ces minéraux est le plus fréquent. On y observe en outre un minéral vert-jaunâtre très-vitreux, qui y forme tantôt des grains isolés, tantôt des nodules composés de grains soudés ensemble. Ce minéral caractéristique du basalte porte le nom de *péridot;* on le désigne aussi sous le nom d'*olivine,* emprunté à sa couleur d'un vert d'olive.

Les basaltes se sont, comme les trachytes, répandues sur la surface du sol en nappes horizontales, mais minces et rarement nombreuses. Ils sont presque toujours cristallins et possèdent en outre une grande uniformité. On n'y reconnaît plus que les effets du refroidissement combinés avec ceux des lois de l'hydrostatique. Si le basalte répandu dans une vallée rappelle par sa forme celle d'un liquide, c'est celle d'un liquide en repos et non, comme les laves, celle d'un torrent instantanément congelé. L'uniformité qui caractérise les basaltes, indépendamment de leur composition, tient à la grande fluidité que ces roches ignées doivent avoir possédée. Cette fluidité est du reste attestée également par l'étendue des filons de basalte et la longueur des nappes qu'ils ont produites.

Le basalte possède une autre propriété caractéristique et très-remarquable qui consiste à se présenter en prismes atteignant quelquefois des dimensions considérables. Cette forme prismatique est due

au retrait qui a suivi le refroidissement. Cette disposition prismatique si habituelle lui a même fait donner des noms locaux qui la rappellent : on dit les *Orgues de Bort* pour désigner la coulée basaltique que l'on voit près de cette ville. Les beaux prismes des environs de Mauriac sont appelés dans le pays la *Colonnade de Murat;* elle s'élève à la hauteur de 40 pieds.

3°. Des volcans de l'époque actuelle. — Les volcans à cratère, qui forment le troisième ordre de terrains volcaniques, sont assez nombreux et distribués d'une manière très-remarquable sur la surface du globe. Leur nombre connu est de 299. En Europe on peut citer l'Hécla en Islande, et dans la Méditerranée, le Vésuve, l'Etna, et le Stromboli, situé près de la côte de Sicile. Parmi les autres, 271 sont placés sur un grand cercle de la terre qui se dirige de la pointe sud de l'Amérique méridionale, en longeant l'océan Pacifique, jusque dans les îles de la Sonde. Tous ces volcans sont retirés sur des montagnes et jamais au centre de grandes plaines de roches stratéfiées ; ils sont tous en activité.

Les volcans sont le théâtre de phénomènes très-remarquables, les éruptions volcaniques.

Presque toujours les éruptions volcaniques sont annoncées par des tremblements de terre. On le conçoit aisément si l'on observe que le phénomène se termine par la solidification d'une certaine couche de matières volcaniques s'arrêtant dans le cratère, qu'elles ferment jusqu'à ce qu'arrive une nouvelle éruption de laves; alors la croûte qui leur ferme l'issue résiste pendant quelque temps à la force expansive des gaz dilatés à l'intérieur, et c'est cette résistance qui se trahit par des ébranlements communiqués aux parties avoisinantes du sol.

Les tremblements de terre et les bruits souterrains qui les accompagnent ne se font pas sentir seulement au pied du volcan, mais souvent à de fort grandes distances.

Le cratère du volcan commence à lancer des bombes volcaniques, fragments solides résultant du brisement de la croûte qui en avait momentanément obstrué le fond; il s'échappe alors du cratère des torrents de gaz composés en grande partie de vapeur d'eau, avec un peu d'acide sulfureux et d'hydrogène sulfuré. Les gaz entraînent avec eux des matières pulvérulentes (cendres volcaniques) qui retombent en pluie très-épaisse autour du volcan, et en même temps des blocs souvent très-gros et des lapilli (petits fragments de scories), la plupart incandescents, sont projetés hors du cratère. Ces masses énormes de gaz produisent au-dessus du cratère des volcans des nuages très-chargés d'électricité, sources de pluies et d'orages qui sont souvent pour la contrée la cause de bien plus grands ravages que n'en font les coulées de lave.

Quand le banc de lave en fusion arrive vers le haut de la cheminée volcanique, au fond du cratère, sa surface venant à être découverte, rayonne vivement vers le nuage, et l'on croit alors voir sortir du volcan des flammes très-vives : bientôt les ébranlements communiqués à la montagne en crevassent les flancs, et le bain de lave fondue s'échappe par l'ouverture : la vase se déverse du côté où elle trouve le moins d'obstacles, en s'écoulant à une distance plus ou moins considérable; elle continue à marcher pendant un temps variable qui va

jusqu'à quinze et dix-huit mois dans les éruptions de l'Etna, et jusqu'à cinq ou six dans celles du Vésuve.

Quand la lave commence à couler, les premiers phénomènes de l'éruption cessent, le cratère continue à projeter des cendres et des lapilli, puis tous ces phénomènes disparaissent peu à peu, et la lave cesse de sortir de son cratère.

Les laves en mouvement laissent constamment échapper des gaz connus sous le nom de *fumarolles* et qui ne sont autre chose que de la vapeur d'eau acidulée par un peu d'acide sulfurique ou d'acide hydrochlorique : cette eau s'échappe de la lave même dans laquelle elle était maintenue en combinaison par la haute température dont la masse est douée, combinaison qui se défait par le refroidissement.

Pendant l'émission des laves et longtemps après, il se dégage des masses considérables d'acide carbonique.

Le principal produit des volcans est donc formé par les laves, roches de composition variable, mais dont la forme intérieure et extérieure annonce une matière plus ou moins visqueuse qui a coulé. La propriété principale des laves est de se modeler sur les sinuosités qu'elles parcourent et de réfléchir, pour ainsi dire, en elles-mêmes toutes les irrégularités du sol. Une fois refroidies, elles restent comme la peinture immobile d'un phénomène d'hydrodynamique; et c'est là ce qui donne aux coulées des volcans modernes le cachet particulier qui frappe le moins exercé. La structure et la forme des laves est en rapport avec les pentes sur lesquelles les coulées s'épanchent.

Après sa sortie du cône volcanique, la lave en fusion se refroidit bientôt à l'extérieur, se solidifie en se ridant de toutes les manières, et se recouvre ainsi d'une croûte ordinairement scoriacée dont l'épaisseur devient de plus en plus grande. Cette croûte empêche la lave liquide qu'elle enveloppe de s'étendre en largeur et permet alors au courant de conserver une certaine épaisseur; elle préserve aussi la partie inférieure de la masse contre le refroidissement qui peut être extrêmement lent. Si la source volcanique continue toujours à fournir de la lave, la matière coule dans l'espèce de manchon qui s'est formé, manchon qui se disloque et se reproduit tour à tour. Quand enfin la source est tarie, la lave emprisonnée dans le manchon continue à couler, et il arrive un moment où, devenant de plus en plus visqueuse, elle cesse de s'avancer et produit une sorte de culot plus ou moins épais à l'extrémité de la coulée. Quand la pente du terrain sur lequel la lave coule est très-forte, la matière forme constamment un courant étroit et peu épais, et quand la source est épuisée, il ne reste plus à la surface du sol qu'une croûte superficielle de matière celluleuse en fragments plus ou moins contournés. Mais quand la pente est très-faible, la lave coule très-lentement; il se fait des dislocations très-fortes dans le manchon solidifié qui l'enveloppe, et la surface de la coulée présente une grande irrégularité. Si la lave enfin coule sur un plan sensiblement horizontal, elle s'arrête d'elle-même après s'être étalée sur un certain espace, lorsque l'équilibre s'établit entre la résistance du manchon et la force qui tend à le briser; la lave forme alors des nappes à surfaces assez minces.

MÉCANIQUE DES CORPS SOLIDES.

DÉFINITIONS.

Des forces. — Lorsqu'un corps est en repos, il y reste indéfiniment s'il ne survient certaines causes en dehors de lui qui le mettent en mouvement. Ces causes se nomment *des forces*, et la direction d'une force est celle de la ligne suivant laquelle le point se mouvrait en vertu de son action, s'il était entièrement libre. On dit que des forces sont égales lorsque, appliquées en sens contraires à un même point libre et en repos, elles ne lui font prendre aucun mouvement. La notion de l'égalité conduit à celle du rapport quelconque ; en entendant par *somme* de plusieurs forces la force qui peut remplacer l'ensemble des premières sollicitant le même point dans la même direction ; les forces peuvent être évaluées en nombre ou être représentées par des longueurs ; il sera commode de prendre ces longueurs sur la direction suivant laquelle elles agissent, et à partir du point auquel elles sont appliquées.

Inertie de la matière. — Tout point matériel en repos y reste tant qu'il ne survient aucune action extérieure ou force ; et s'il se meut sans qu'aucune force lui soit appliquée, son mouvement sera rectiligne et uniforme : mais il ne faut pas entendre par là qu'un corps n'entre pour rien dans la production des forces qui peuvent agir sur lui. L'ensemble des phénomènes naturels montre, au contraire, que ces forces naissent toujours de l'action mutuelle de ce corps et d'autres corps. L'inertie consiste donc en ce qu'un point matériel ne peut changer de lui-même son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, et qu'il faut toujours pour cela l'existence et l'action d'autres points matériels.

Masse. — La même force ne produit pas toujours un mouvement identique, quand elle est appliquée à des corps différents : ce fait donne lieu à une notion nouvelle qui est celle de *masse*. On dit que deux corps d'espèce quelconque ont même masse, lorsque des forces égales produisent des mouvements identiques sur ces corps libres et partant du repos. Si on lie ensemble deux corps, on en forme un nouveau dont la masse est dite *la somme des masses* des deux autres. L'idée de masses égales conduit à celle de masses dans un rapport quelconque, et les masses de tous les corps peuvent être représentées par des nombres, si on les rapporte à celle d'un volume connu d'une matière déterminée. Ainsi donc les corps formés d'une même substance homogène ont des masses proportionnelles à leurs volumes et, par conséquent, aux quantités de matières qu'ils renferment.

La notion de la masse offre cette différence essentielle avec celle de la force, qu'elle ne saurait s'acquérir, comme elle, par l'équilibre, et qu'elle ne peut se déduire que de la considération du mouvement.

Densité. — La densité d'un corps homogène est la masse renfermée

sous l'unité de volume; elle est, par conséquent, le rapport de la masse renfermée sous un volume quelconque à ce volume.

Lorsque des forces sont appliquées à un système de points, ayant entre eux des liaisons quelconques, il est possible qu'elles produisent un mouvement, comme il est possible aussi qu'elles s'entre-détruisent, et que le système reste en repos; dans ce dernier cas on dit que ces forces sont *en équilibre*.

L'ensemble des lois de l'équilibre forme ce qu'on appelle *la statique* (*); les lois du mouvement forment ce que l'on appelle *la dynamique*; et la réunion de ces deux branches constitue la science à laquelle on a donné le nom de *mécanique*.

Dynamique. — L'objet de la dynamique est la connaissance des mouvements que prend un corps ou un système de corps, en vertu des forces qui agissent sur lui.

L'idée qu'on doit se former des forces qui agissent sur les corps est celle d'une action qui s'exerce sur quelques-unes ou sur la totalité de leurs parties, et par suite de laquelle ces parties ont une tendance à acquérir une vitesse donnée, dans un temps donné et dans une certaine direction. Cette action peut s'exercer dans un temps très-court, comme dans le cas d'un choc; elle peut être permanente, comme l'est l'action de la pesanteur, ou enfin elle peut être constante ou variable avec le temps.

Quand le corps sur lequel agit une force permanente est retenu immobile par un obstacle, il s'exerce contre cet obstacle une pression; cette pression est l'équivalent d'un *poids*, et ce poids rapporté à une unité convenue est la mesure de la force.

Quand le corps cède librement à l'action de la force, il prend un mouvement, et sa vitesse croît dans chaque unité de temps d'une certaine quantité. Le produit de cette quantité par la masse du corps est aussi *la mesure de la force*.

Ainsi, en représentant par m la masse d'un corps, par g la vitesse que ce corps acquiert dans l'unité de temps, en vertu de l'action d'une force à laquelle il cède librement (exprimée en unités linéaires); par P la pression que le corps exercerait contre un obstacle immobile, en vertu de l'action de la même force (exprimée en unités de poids), et enfin par P' la pression que le corps exercerait en vertu de l'action de la même force, contre un obstacle qui reculerait en acquérant la vitesse g' dans l'unité de temps, on a les relations

$$P = mg, \quad P' = m(g - g').$$

Quand l'action d'une force sur un corps, après avoir duré quelque temps, vient à cesser, le corps, s'il est libre, continue à se mouvoir, suivant la direction et avec la vitesse qu'il avait à l'instant où la force a cessé d'agir. Cette propriété est ce que l'on nomme l'*inertie*.

Quantité de mouvement. — Quand un corps se meut, on nomme *quantité de mouvement* de ce corps le produit de sa masse par sa vitesse.

(*) *Voir* la Statique dans le *Manuel des Conducteurs des Ponts et Chaussées et des Agents voyers*, par J. Regnault.

Force vive d'un corps. — On nomme *force vive d'un corps* qui se meut, le produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

Égalité de temps. — Nous dirons que deux intervalles de temps sont égaux, lorsque deux corps identiques, placés dans des circonstances identiques au commencement de chacun de ces intervalles et soumis aux mêmes actions et influences de toute espèce, auront parcouru des espaces identiques à la fin de ces intervalles. La notion de l'égalité conduit immédiatement à celle d'un rapport quelconque.

Mouvement uniforme. — Le mouvement d'un point est dit *uniforme*, lorsque ce point parcourt des espaces égaux en temps égaux, quelque petits que soient ces temps.

Mouvement varié. — Lorsqu'un mouvement n'est ni uniforme, ni composé de mouvements uniformes ayant des durées finies, on l'appelle *mouvement varié*.

Vitesse. — Les mouvements uniformes peuvent différer les uns des autres par les espaces parcourus dans des temps égaux, et cette considération donne naissance à l'idée de vitesse; nous appellerons *vitesse* d'un point dont le mouvement est uniforme, l'espace qu'il parcourt dans l'unité de temps, ou, en d'autres termes, le rapport de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir; de sorte que le point dont la vitesse sera exprimée par le nombre 1, parcourra l'unité de longueur dans l'unité de temps; par conséquent, dans un même mouvement, la vitesse sera d'autant plus grande que l'unité de temps le sera davantage; le rapport des vitesses dans des mouvements différents est le rapport des espaces parcourus dans un même temps.

On voit par là que le nombre qui exprime la vitesse varie avec l'unité de longueur; il est d'autant plus grand que cette unité est plus petite.

Équation finie du mouvement uniforme. — Désignons par t le temps compté à partir d'une époque déterminée, par x la distance du point mobile M à une origine fixe O, prise sur la ligne indéfinie X'X que ce point parcourt; par a la distance OA de l'origine au point où se trouve le mobile, lorsque $t=0$; enfin par v sa vitesse ou l'espace constant qu'il parcourt dans l'unité de temps.

Nous nous proposons de trouver une équation entre x et t, c'est-à-dire une équation au moyen de laquelle on puisse connaître la position du point mobile, à une époque quelconque. Or le mobile, parcourant un espace v dans l'unité de temps, parcourra vt dans le temps quelconque t; donc si l'on suppose d'abord que la direction du mouvement soit celle des x positifs OX à un instant quelconque, on aura

$$x = at + vt,$$

x et a étant des quantités positives ou négatives, suivant la position des points A et M par rapport à l'origine; v étant un nombre absolu et t un nombre positif correspondant aux différentes époques postérieures à celle qui sert d'origine aux temps. Pour représenter les différentes positions du mobile qui correspondent aux époques antérieures à cette origine, il suffit de donner à t des valeurs négatives dans l'équation ci-dessus.

Cette équation peut encore renfermer les mouvements uniformes

dont la direction est opposée à celle des x positifs; en effet, il suffit de supposer que v ne représente pas seulement le nombre d'unités de longueur parcourues dans l'unité de temps, mais ce nombre affecté du signe —. De cette manière, l'équation générale

$$(1) \qquad x = a + vt$$

peut représenter tous les mouvements uniformes, rapportés à des origines quelconques pour les temps et les distances et à une direction quelconque du mouvement par rapport à celle des x positifs.

Mouvement uniformément varié. — Après le mouvement uniforme, le plus simple est celui où la vitesse, au lieu d'être constante, varie uniformément, c'est-à-dire de telle sorte que ses accroissements soient proportionnels à ceux du temps.

La condition que la vitesse v ait ses accroissements proportionnels à ceux du temps, entraîne cette autre condition que sa dérivée $\frac{dv}{dt}$ soit constante, et réciproquement. Si donc nous désignons par a une constante quelconque, positive ou négative, l'équation générale qui renfermera tous les mouvements uniformément variés sera

$$\frac{dv}{dt} = a \quad \text{ou} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = a, \quad \text{puisque} \quad v = \frac{dx}{dt}.$$

Les accroissements de la vitesse sont positifs ou négatifs en même temps que a qui est l'accroissement de la vitesse dans l'unité de temps.

Accélération. — On donne à cette dernière quantité le nom particulier d'*accélération;* et selon que cette accélération est positive ou négative, le mouvement peut être dit *uniformément accéléré;* cette dénomination n'entraînant pas l'idée d'une vitesse croissante, plutôt que décroissante.

Mouvement curviligne d'un point. — Direction de la vitesse. — La définition que nous avons donnée de la grandeur de la vitesse est indépendante de la ligne que décrit le mobile et que l'on nomme ordinairement la *trajectoire*. Mais quand le mouvement est curviligne, il faut y introduire la considération de la direction. Dans le mouvement rectiligne, la droite qui joint une position du mobile avec une autre infiniment voisine, a toujours une même direction, celle d'une ligne droite, et que l'on nomme la *direction du mouvement*. Dans le mouvement curviligne, la droite qui joint une position déterminée à celle qu'il a, après un temps infiniment petit, varie à mesure que l'intervalle diminue, et tend vers une limite que l'on appelle la *direction du mouvement* à l'instant considéré, et que nous nommerons spécialement *direction de la vitesse* à cet instant. Elle se confond avec la tangente à la trajectoire au point que l'on considère, prise dans le sens du mouvement.

Les cosinus des angles qu'elle fait avec les trois axes d'un système de coordonnées rectangulaires seront donc, en grandeur et en signes,

$$\frac{dx}{ds}, \quad \frac{dy}{ds}, \quad \frac{dz}{ds};$$

ds est la valeur absolue de l'élément de l'axe; dx, dy, dz sont les

accroissements positifs ou négatifs des coordonnées x, y, z du mobile dans le temps infiniment petit dt.

Composition et décomposition des vitesses. — La statique nous apprend que lorsque plusieurs forces sont appliquées à un même point, elles peuvent être remplacées par une seule; on peut obtenir cette résultante par une construction géométrique très-simple, lorsque toutes les forces sont représentées, pour leurs grandeurs et pour leurs directions, par des droites partant de ce point; c'est dans ce sens que l'on emploie quelquefois ces expressions *résultante de droites* données de grandeur et de direction partant d'un même point; *composantes* d'une ligne de direction et de grandeur données. C'est encore dans ce même sens que nous entendrons la *composition* et la *décomposition des vitesses.* Ainsi, pour avoir les composantes d'une vitesse donnée, suivant trois directions données, nous construirons sur la droite qui la représente en grandeur et en direction, un parallélipipède dont elle soit la diagonale et dont les trois côtés soient dans les directions choisies pour les composantes. Si l'une des composantes étant parallèle à une direction donnée, toutes les autres lui sont perpendiculaires, cette composante est ce qu'on appelle la *vitesse estimée* de cette direction.

Composantes de la vitesse parallèlement aux axes. — Si l'on suppose les axes rectangulaires, ces composantes ne seront autre chose que les projections de la vitesse sur les axes. En prenant la vitesse en valeur absolue, et sa direction comme il a été convenu, il faudra faire les produits de $\frac{ds}{dt}$ respectivement par $\frac{dx}{ds}$, $\frac{dy}{ds}$, $\frac{dz}{ds}$, ce qui donnera, pour les composantes de la vitesse,

$$\frac{dx}{dt}, \quad \frac{dy}{dt}, \quad \frac{dz}{dt}.$$

Elles seront positives ou négatives, suivant que la direction de la vitesse fera avec les axes des angles aigus ou obtus.

On peut remarquer que $\frac{dx}{dt}$ est la vitesse d'un point qui se mouvrait sur l'axe des x en ayant toujours la même abscisse que le point dans l'espace; et il en serait de même pour les deux autres composantes. D'où l'on voit que les composantes de la vitesse d'un mobile sont les vitesses de ses projections rectangulaires ou obliques sur les trois axes de coordonnées.

Déviation. — Soit un point animé d'un mouvement varié quelconque et à un instant quelconque; menons la tangente de sa trajectoire au point M (*fig.* 1, *Pl. VIII*) où il se trouve. Concevons ensuite qu'à cet instant un second mobile commence à se mouvoir sur la tangente avec la vitesse qu'a le premier en M; et soient M′, N les positions simultanées de ces deux points après un temps quelconque; la droite NM′ indique de combien le mobile a été dérangé de la position qu'il auraiteue si sa vitesse était restée constante en grandeur et en direction; sa considération est très-importante dans l'étude du mouvement, principalement lorsque l'intervalle de temps écoulé entre les positions M′ et M est infiniment petit. Nous lui donnerons le nom de *déviation.* Elle pourra

être envisagée sous le rapport tant de la grandeur que de la direction qui sera toujours estimée de N vers M'. Elle sera par conséquent entièrement déterminée quand on connaîtra, en grandeur et en signe, ses trois composantes parallèles aux axes.

Composantes de la déviation suivant les axes. — Soit θ un intervalle de temps infiniment petit, les coordonnées de N sur la tangente seront après ce temps,

$$x + \frac{dx}{dt}\theta, \quad y + \frac{dy}{dt}\theta, \quad z + \frac{dz}{dt}\theta.$$

Celles du point M' sur la trajectoire seront, en les développant par la formule de Taylor, et représentant par ε, ε', ε'' des quantités infiniment petites,

$$x + \frac{dx}{dt}\theta + \left(\frac{d^2x}{dt^2} + \varepsilon\right)\frac{\theta^2}{2},$$
$$y + \frac{dy}{dt}\theta + \left(\frac{d^2y}{dt^2} + \varepsilon'\right)\frac{\theta^2}{2},$$
$$z + \frac{dz}{dt}\theta + \left(\frac{d^2z}{dt^2} + \varepsilon''\right)\frac{\theta^2}{2}.$$

En retranchant les coordonnées de N de celles de M', on aura en grandeurs et en signes les composantes de la déviation NM'; leurs valeurs sont

$$\left(\frac{d^2x}{dt^2} + \varepsilon\right)\frac{\theta^2}{2}, \quad \left(\frac{d^2y}{dt^2} + \varepsilon'\right)\frac{\theta^2}{2}, \quad \left(\frac{d^2z}{dt^2} + \varepsilon''\right)\frac{\theta^2}{2}.$$

Les expressions des composantes de la déviation peuvent être simplifiées lorsque θ est infiniment petit, car on peut alors négliger le second terme qui est infiniment petit, par rapport au premier; elles se réduisent à

$$\frac{d^2x}{dt^2}\frac{\theta^2}{2}, \quad \frac{d^2y}{dt^2}\frac{\theta^2}{2}, \quad \frac{d^2z}{dt^2}\frac{\theta^2}{2},$$

et la déviation elle-même devient, en supposant les angles rectangulaires,

$$\frac{\theta^2}{2}\sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Direction de la déviation. — La limite vers laquelle tend la direction NM' à mesure que M' tend vers M, est ce que l'on nomme la *direction de la déviation*. La direction de la déviation au point M fait avec les axes, des angles dont les cosinus peuvent être représentés proportionnellement en grandeur et en signe par les trois quantités

$$\frac{d^2x}{dt^2}, \quad \frac{d^2y}{dt^2}, \quad \frac{d^2z}{dt^2}.$$

Leurs valeurs s'obtiendraient en divisant ces quantités par l'expression

$$\sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Si le mouvement avait lieu suivant une ligne droite, la déviation

serait dirigée suivant cette même droite; en effet, dans ce cas, les quantités $\frac{d^2x}{dt^2}$, $\frac{d^2y}{dt^2}$, $\frac{d^2z}{dt^2}$ sont proportionnelles à $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$, $\frac{dz}{dt}$.

Accélération dans le mouvement déviatoire. — En négligeant les quantités infiniment petites par rapport à la déviation NM', nous avons vu que la valeur de cette quantité était

$$\text{NM}' = \frac{\theta^2}{2}\sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Elle croît donc comme l'espace parcouru d'un mouvement uniformément accéléré par un mobile partant du repos, l'accélération étant égale à

$$\sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Ainsi, en se représentant la déviation comme décrite par le mouvement d'un point et bornant l'approximation aux quantités qui suffisent pour le calcul des accroissements infiniment petits de vitesse, on peut dire que le mouvement déviatoire est uniformément accéléré.

En multipliant la valeur ci-dessus de l'accélération par les cosinus des angles formés avec les axes par la direction de la déviation, on trouvera pour les composantes de cette accélération, en grandeur et en signes, les trois expressions

$$\frac{d^2x}{dt^2},\quad \frac{d^2y}{dt^2},\quad \frac{d^2z}{dt^2}.$$

Composantes de la déviation suivant la tangente et la normale. — Les composantes de la déviation suivant les axes ont pour expression, si l'on néglige les quantités infiniment petites par rapport à ces composantes,

$$\frac{\theta^2}{2}\frac{d^2x}{dt^2},\quad \frac{\theta^2}{2}\frac{d^2y}{dt^2},\quad \frac{\theta^2}{2}\frac{d^2z}{dt^2}.$$

Soient NM' (*fig.* 1, *Pl. VIII*) la déviation, M'P la perpendiculaire abaissée de M' sur la tangente en M; NP et PM' seront les composantes de NM' suivant la tangente et la direction PM'. La composante tangentielle NP s'obtiendra, en grandeur et en signe, en projetant sur la tangente les trois composantes de NM' suivant les axes. En supposant toujours les axes rectangulaires, les cosinus des angles que forme avec eux la direction de la tangente prise dans le sens du mouvement sont

$$\frac{dx}{ds},\quad \frac{dy}{ds},\quad \frac{dz}{ds},$$

d'où il suit que la composante tangentielle de la déviation aura pour valeur

$$\frac{\theta^2}{2}\,\frac{dx\,d^2x + dy\,d^2y + dz\,d^2z}{ds\,dt^2}.$$

Mais de l'équation

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 = ds^2,$$

on tire

$$dx\,d^2x + dy\,d^2y + dz\,d^2z = ds\,d^2s;$$

l'expression précédente devient donc

$$\frac{\theta^2}{2}\frac{d^2s}{dt^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\theta^2}{2}\frac{dv}{dt}.$$

Quant à la seconde composante M'P, on sait que si l'on désigne par R le rayon de courbure de la trajectoire en M, on aura, en négligeant les quantités infiniment petites par rapport à M'P,

$$M'P = \frac{\overline{MM'}^2}{2R};$$

mais MM' étant l'espace parcouru dans le temps θ, on pourra remplacer MM' par $v\theta$, et l'on aura le degré d'approximation demandé,

$$M'P = \frac{\theta^2 v^2}{2R}.$$

Cette équation donne la valeur de la composante normale, dont la direction peut être remplacée par sa direction limite, sans changer le degré d'approximation. Cette direction limite est celle de la normale menée du point M au centre de courbure de la trajectoire. Ces deux composantes peuvent être désignées par les noms de *déviation tangentielle* et *déviation centripète*.

On voit, d'après les expressions de ces deux composantes, que si le mouvement est uniforme, la déviation est normale à la trajectoire; et s'il est rectiligne, R étant infini, la déviation est dans le sens de la tangente ou de la ligne du mouvement.

Composantes tangentielle et normale de l'accélération dans le mouvement déviatoire. — Le mouvement déviatoire étant dirigé suivant NM', et par suite aussi l'accélération de ce mouvement, les composantes de cette accélération suivant la tangente et la normale principale seront, avec l'accélération elle-même, dans les mêmes rapports que NP, PM', NM', et les composantes de l'accélération dans un mouvement rectiligne NM' sont les accélérations des mouvements des projections du point sur les directions que l'on considère; nous aurons donc les expressions des composantes de l'accélération en divisant par $\frac{\theta^2}{2}$ les expressions des espaces infiniment petits NP, PM', parcourus dans le temps θ.

Les composantes tangentielle et normale de l'accélération du mouvement déviatoire sont donc, la première $\frac{d^2s}{dt^2}$ ou $\frac{dv}{dt}$, et la seconde $\frac{v^2}{R}$.

On les désigne quelquefois sous les noms d'*accélération tangentielle* et *accélération centripète*.

MOUVEMENT DE TRANSLATION ET DE ROTATION.

Si l'on veut faire subir un déplacement à un système, on peut l'amener dans sa nouvelle position, en faisant d'abord mouvoir tous les points suivant des lignes parallèles et égales à celle qui joint les deux positions d'un même point du système, ou d'un point quelconque qu'on y aura lié invariablement, puis en laissant ce point fixe, et en faisant tourner le système autour de lui, jusqu'à ce que

deux autres points, non en ligne droite avec ce centre, viennent prendre la position qu'ils doivent occuper.

Le point que l'on a considéré pourrait parvenir d'une position à l'autre en décrivant un polygone quelconque, qui commencerait à l'une et se terminerait à l'autre. D'où il suit que le premier mouvement pourra être remplacé par une suite d'autres mouvements de translation, représentés en grandeur et en direction par les divers côtés de ce polygone. Cette substitution de plusieurs mouvements successifs à un seul s'appellera *composition*, et l'inverse *décomposition*. Ainsi les mouvements de translation peuvent se composer et se décomposer de la même manière que les forces appliquées à un même point.

Le mouvement autour du point fixe peut être décomposé de diverses manières en deux mouvements autour d'axes fixes; en effet, on amènerait un point quelconque d'une position à une autre, en faisant tourner le système autour d'une droite quelconque passant par le point fixe, et située dans le plan mené par ce point, perpendiculairement à la droite qui joint les deux positions du point que l'on considère, lesquelles sont équidistantes du centre. Le système ayant alors deux de ses points dans la position qu'ils doivent occuper, il est certain que tous les centres arriveront à la leur par un mouvement de rotation autour de la droite qui joint les deux premiers. La question est donc réduite à la considération des mouvements de rotation autour d'axes par le point fixe.

Remarque. — Dans la détermination du déplacement infiniment petit d'un corps qui tourne autour d'un axe, on peut supposer que le corps, au lieu de partir de la position donnée, parte d'une autre position infiniment voisine; les variations des coordonnées de chacun de ces points, ainsi calculées, pourront être prises pour celles que l'on cherchait. Si donc on a à faire éprouver successivement à un corps un nombre quelconque de rotations successives infiniment petites, on pourra supposer chacune d'elles effectuée à partir de la position primitive du corps, et la somme totale des variations des coordonnées de chaque point pourra être considérée comme la variation résultante des mouvements opérés à la suite les uns des autres, et dans un ordre quelconque.

De même, si le système tournait de la même quantité infiniment petite autour d'un axe infiniment voisin de celui qui est donné, les variations des coordonnées d'un point à une distance finie ne seraient altérées que de quantités infiniment petites par rapport à elles-mêmes, et qui pourraient conséquemment être négligées.

Ainsi il n'y a aucune erreur dans l'expression des variations des coordonnées des divers points d'un système rigide qui tourne successivement, de quantités angulaires infiniment petites, autour d'axes en nombre quelconque, lorsque l'on substitue à ces divers points, d'autres points infiniment voisins, ou lorsque l'on substitue à ces axes d'autres axes infiniment peu différents. C'est à cause de ces avantages que l'on décompose les mouvements effectués dans des temps finis dans ceux qui s'accomplissent dans les intervalles infiniment petits dans lesquels on peut décomposer ces temps. Ainsi, tout ce que nous

dirons sur la composition et la décomposition des mouvements se rapportera au cas où ces mouvements seront infiniment petits.

Vitesse angulaire. — Considérons le mouvement continu de rotation d'un système rigide, et concevons un plan passant par l'axe et lié invariablement au système. La position de ce plan détermine celle de tous les autres points, et peut être donnée à chaque instant par l'angle φ qu'il fait avec un plan fixe mené par l'axe. On nomme *vitesse angulaire d'un système* l'angle décrit par le plan mobile dans l'unité de temps ; c'est la vitesse de tout point situé à l'unité de distance de l'axe. Si les accroissements de cet angle sont proportionnels aux accroissements du temps, le mouvement angulaire du système est uniforme. Si le mouvement angulaire est varié et que l'angle φ soit une fonction quelconque du temps, on appellera vitesse angulaire à un instant quelconque la limite de la vitesse angulaire moyenne avec laquelle un angle infiniment petit serait décrit à partir de cet instant. Sa valeur est la dérivée de l'angle par rapport au temps ou $\frac{d\varphi}{dt}$; et l'angle décrit dans un temps infiniment petit peut être considéré comme le produit de la vitesse angulaire par ce temps.

Cas des axes concourants.—Soit AO (*fig.* 2, *Pl. VIII*) la direction d'un axe autour duquel un système rigide tourne, d'une quantité angulaire quelconque 2α, le sens de la rotation étant déterminé de la manière indiquée précédemment; soit de même OB un second axe autour duquel le système tourne d'une quantité angulaire 2β, quand le premier mouvement est accompli : nous allons démontrer que le système arriverait à la même position par une rotation unique, autour d'un axe passant par le même point O. En effet, menons par OA un plan qui fasse avec le plan AOB un angle α du côté de OB, et par OB un autre plan faisant avec AOB un angle β du côté de AO. Il est évident qu'après la première des deux rotations, l'intersection OD de ces deux plans aura pris la position symétrique par rapport au plan AOB, et qu'après la seconde rotation, elle aura repris sa première position. Donc le système parviendrait à la seconde position en tournant autour de l'axe OD. Ceci a lieu quels que soient les angles 2α, 2β; mais nous examinerons particulièrement le cas où ils sont infiniment petits. Dans l'angle trièdre formé par les arêtes OA, OB, OD, les sinus des angles BOD, AOD, sont entre eux comme $\sin\alpha$, $\sin\beta$; donc la limite de $\frac{\alpha}{\beta}$, qui est le rapport des vitesses angulaires, en supposant ces angles décrits dans un même temps, est égale au rapport des sinus des angles formés avec OB, OA, par la limite de la direction de l'axe OD, qui se trouve dans le plan AOB lui-même. Ainsi les deux rotations infiniment petites, dont le rapport des vitesses angulaires est connu, se composent en une seule, autour d'un axe dirigé suivant la diagonale OP du parallélogramme construit sur les lignes OM, ON (*fig.* 3, *Pl. VIII*), proportionnelles à ces vitesses angulaires, et portées, à partir du point O, sur les axes correspondants. Pour connaître le sens et la grandeur de la vitesse angulaire du mouvement résultant, on choisira un point quelconque I sur l'axe OA, autour duquel s'est effectuée la première rotation; il ne se déplacera qu'à la seconde, et il décrira

une ligne infiniment petite IL perpendiculaire au plan AOB. Abaissons les perpendiculaires IK, IH sur OB et OD. Les angles infiniment petits, dont le point I tourne autour de OB ou de OD pour parvenir à sa position L, sont dus à des mouvements de même sens et en raison inverse de IK et IH ou de sin KOI et sin HOI, ou enfin de OP et ON. Donc la vitesse angulaire résultante sera représentée par la diagonale OP, puisque la vitesse angulaire autour de OP l'est par ON. De plus, d'après ce que nous avons dit, le sens de la rotation autour de OD est de gauche à droite comme autour de OB. Donc si l'on prend sur la direction de deux axes, à partir de leur point de concours, des grandeurs qui représentent les vitesses angulaires des rotations successives autour de ces deux axes, la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux lignes représentera la direction de l'axe de la rotation résultante, et la grandeur de sa vitesse angulaire.

On conclut de là que *la composition et la décomposition de rotations en nombre quelconque autour d'axes passant par un même point s'effectuent de la même manière que celles des forces dirigées suivant ces axes, et représentées en grandeur par les vitesses angulaires correspondantes.*

Cas des axes parallèles. — Supposons maintenant deux axes parallèles dont les directions soient dans le même sens, par exemple au-dessus du plan perpendiculaire sur lequel ils sont projetés. Soient A et B leurs projections, et 2α, 2β les angles dont le système tourne successivement autour de A et de B. Soit AC (*fig.* 4, *Pl. VIII*) la trace d'un plan passant par l'axe A et faisant avec AB l'angle CAB $= \alpha$ du côté de B; et soit de même BC faisant l'angle CBA $= \beta$ du côté de A. La parallèle aux axes, menée par le point C, reviendra à sa première position après les deux rotations effectuées dans l'ordre indiqué. Le déplacement proposé serait donc produit par une rotation autour de cette droite.

Lorsque les angles α et β sont infiniment petits, le point C est sur la droite AB en un point C′ qui la partage en raison inverse des angles α et β ou des vitesses angulaires. De plus, lorsque la rotation est effectuée autour de A, et qu'elle s'effectue ensuite autour de B, le point A étant situé du même côté de C′ est B, et la rotation de C′ devant l'amener au même point, il en résulte qu'elle est dans le même sens que les deux autres. Il ne reste donc plus qu'à connaître la vitesse de la rotation résultante. Soit AD la ligne infiniment petite que décrit le point A autour de B, il décrira la même ligne autour de C′, et les vitesses angulaires seront en raison inverse de AB et de AC′. Donc si les vitesses angulaires autour de A et B sont représentées respectivement par BC′ et AC′, la vitesse angulaire résultante le sera par AB.

La loi de composition de deux rotations de même sens autour d'axes parallèles est donc identique avec celle de la composition des forces parallèles de même sens. On trouverait la même identité dans le cas de rotations de sens contraires, soit en le déduisant du précédent, comme dans la composition des forces, soit en le traitant directement.

Couples de rotations. — Si les deux rotations que l'on a à com-

poser sont égales et de sens contraires, on a ce que M. Poinsot appelle *couples de rotations*. L'effet de ces deux rotations est de donner un mouvement de translation au système dans le sens de l'axe de ce couple. En effet, soit M (*fig.* 5, *Pl. VIII*) un point quelconque du système, il se mouvra dans un plan perpendiculaire aux axes; et si, pour chacune des rotations, il décrit les lignes infiniment petites MC, MD, respectivement perpendiculaires aux droites MA, MB et proportionnelles à leurs longueurs, il parviendra à l'extrémité N de la diagonale du parallélogramme construit sur MC, MD. Or les triangles MCN, AMB sont semblables comme ayant un angle égal compris entre côtés proportionnels, d'où il suit que MN est perpendiculaire à AB. L'effet d'un couple de rotations est donc un mouvement de translation dans le sens de l'axe de ce couple, et qui reste le même, de quelque manière qu'on place ce couple dans son plan, ou dans tout plan parallèle. Pour connaître l'espace parcouru, il suffit de considérer un point quelconque A, par exemple, et il est facile de voir qu'il se déplace d'une quantité égale à la distance AB multipliée par l'angle de rotation.

Toute translation pouvant ainsi être remplacée par deux rotations, on pourrait se borner à considérer des mouvements de rotation.

Les mouvements de translation se composent comme les forces appliquées à un même point; les couples de rotations se composeront de la même manière, et si l'on porte sur l'axe de chacun d'eux une longueur égale à l'angle de rotation multiplié par le bras de levier de ce couple, c'est-à-dire par la distance de deux axes de rotation, ces longueurs composées comme des forces, à partir du même point, donneront en grandeur et en direction le mouvement de translation résultant.

Remarque. — Une rotation autour d'un axe A peut toujours être remplacée par une rotation identique autour d'un axe B parallèle au premier, plus un couple de rotations dont le bras de levier serait AB; car il suffit, pour cela, d'introduire deux rotations autour de l'axe B qui soient égales à la première et de sens opposés, ce qui ne change rien au déplacement.

Réduction générale de tout mouvement. — Quelles que soient les rotations et translations infiniment petites opérées sur un système, elles peuvent se réduire à une rotation autour d'un axe passant par un point arbitraire, et une translation dépendante de ce point.

En effet, toute rotation autour d'un axe peut être changée en une rotation identique autour d'un axe parallèle mené par ce point quelconque, plus une translation, ou un couple de rotations, dépendant de la position du nouvel axe. Toutes les rotations composées donneront la même rotation résultante autour d'un axe de direction constante, quel que soit le point où l'on ait transporté tous les axes. Mais les mouvements de translation ou couples de rotations donnés, composés avec ceux qu'on a introduits, donneront un couple résultant, ou une translation, variable de grandeur et de direction.

Réduction générale à un mouvement hélicoïdal. — Nous avons réduit tout mouvement à deux autres, l'un de translation dépendant du point choisi, l'autre de rotation et constant quant à la direction et à la grandeur. Décomposons le premier en deux, l'un parallèle à

l'axe de rotation, l'autre perpendiculaire. Ces mouvements infiniment petits pouvant être effectués dans un ordre quelconque, nous commencerons par la translation parallèle à l'axe; il restera une rotation et une translation perpendiculaire à l'axe, qui se composeront, comme on vient de le voir, en une simple rotation autour d'un axe parallèle au premier.

Tout mouvement est donc réductible à une rotation autour d'un axe, et une translation parallèle à cet axe, mouvement qui n'est autre que celui d'une vis dans son écrou. Il est facile de voir que cette translation parallèle à l'axe est la projection, sur cet axe, de la première translation à quelque point qu'elle se rapporte. Elle est toujours la même et égale à la quantité commune dont tous les points du corps, en passant de leur première position à la seconde, se sont éloignés d'un même plan perpendiculaire à la direction déterminée de l'axe. Enfin, elle est la plus petite translation possible, puisqu'elle est la projection de toutes les autres.

Mouvement continu parallèlement à un plan fixe. — Ce mouvement peut être réduit à celui d'une figure plane dans son plan. Décomposons le temps en éléments infiniment petits. Le mouvement opéré dans chacun de ces intervalles pourra être considéré comme une rotation effectuée autour d'un point déterminé que l'on nomme *centre instantané de rotation;* et l'ensemble de ces centres a pour limite un lieu géometrique continu, entièrement déterminé et immobile sur le plan. Si l'on considère tous les points liés à la figure mobile, qui sont venus successivement coïncider avec les points du premier lieu à l'instant où ils étaient centres de rotation, on aura un second lieu, invariablement lié avec la fignre mobile, et se déplaçant sur le plan. Si l'on connaissait le mouvement de ce lieu, il déterminerait réciproquement celui de la figure qui lui est liée. Or nous allons voir qu'il peut être très-simplement défini.

En effet, soient A, B, C, D, E, F, etc. (*fig.* 6, *Pl. VIII*) les positions successives des centres de rotation correspondants aux divers intervalles de temps; A', B', C', D', etc., les points liés à la figure, et qui viennent coïncider respectivement avec les premiers, à l'instant où ils deviennent centres de rotation. Lorsque, par exemple, B' est en B, la figure tourne autour de B jusqu'à ce que C' vienne en C; alors elle tourne autour de C jusqu'à ce que D' vienne en D, et ainsi de suite. D'où il suit que ces deux polygones ont les côtés égaux, et roulent l'un sur l'autre sans glisser, tandis que la figure arrive successivement à toutes les positions qu'elle doit avoir aux instants considérés.

Si nous supposons que les intervalles de temps diminuent indéfiniment, les deux polygones tendent à devenir deux courbes déterminées, l'une fixe, l'autre mobile avec la figure à laquelle elle est invariablement liée. Ces deux courbes sont constamment tangentes; des arcs égaux de ces courbes s'enroulent les uns sur les autres, et par conséquent il n'y a pas glissement. Si donc on adaptait à la figure donnée, la courbe, lieu des centres instantanés relativement à cette figure, il suffirait de faire rouler, sans glisser, cette figure sur celle qui est le lieu des mêmes centres sur le plan fixe, et la figure prendrait ainsi le mouvement qu'elle doit réellement avoir. Pour avoir le mouvement du

corps lui-même, il suffira de considérer les deux surfaces cylindriques qui se projettent sur le plan fixe, suivant ces deux courbes, et de les faire rouler l'une sur l'autre sans glisser.

Mouvement continu autour d'un point fixe. — Ce mouvement peut être décomposé en une infinité d'autres, effectués dans des intervalles de temps infiniment petits, et qui peuvent être considérés comme ayant lieu autour d'axes successifs infiniment voisins. Chacun de ces axes peut être considéré comme lié au corps dans la position où il est relativement à lui à l'instant où il devient axe de rotation.

On a ainsi deux systèmes de droites, l'un immobile dans l'espace, l'autre fixement lié au corps mobile. Le second système constitue un angle solide à faces infiniment petites, qui viennent successivement coïncider avec celles de l'angle solide fixe. Les deux systèmes forment à la limite deux surfaces coniques, l'une fixe, l'autre liée au corps et toujours tangente à la première, suivant une génératrice, puisque les surfaces dont elles sont les limites avaient toujours une face commune.

De plus, il est facile de voir qu'elles ne glissent pas l'une sur l'autre; car la génératrice commune étant l'axe instantané de rotation, a une vitesse nulle, et, par conséquent, ne peut se déplacer que d'une quantité infiniment petite, ce qui exclut tout glissement : c'est d'ailleurs une conséquence immédiate de ce que des faces égales de surfaces polyédriques s'appliquant toujours les unes sur les autres, les surfaces coniques qui s'enrouleront les unes sur les autres le seront elles-mêmes, et, par conséquent, il n'y aura pas de glissement.

On peut donc se représenter le mouvement d'un corps autour d'un point fixe, comme déterminé par le roulement d'un cône fixement lié à ce corps sur un cône immobile dans l'espace, ayant, comme le premier, le point fixe pour sommet.

On rentrerait dans le cas précédent en supposant le point fixe à l'infini.

TRANSFORMATION DES MOUVEMENTS.

Parmi les procédés employés pour la transformation des mouvements, lesquels peuvent tous devenir l'objet d'une théorie géométrique plus ou moins compliquée, on en distingue quelques-uns à raison de l'importance et de la multiplicité de leurs applications. Tels sont, en général, ceux dont l'objet est de transmettre le mouvement d'une roue à une autre roue, ou d'une roue à une verge droite. Cette transmission s'opère par l'intermédiaire de manivelles ou de dents, cames ou ondes qui glissent les unes contre les autres, et dont on peut régler la disposition et la courbure de manière à satisfaire à des conditions données à volonté. La variété des dispositions de ce genre étant infinie, nous nous bornerons à celles employées le plus fréquemment et dont l'usage a constaté l'utilité.

DES MANIVELLES.

Le rayon CM (*fig.* 7, *Pl. VIII*) tournant autour du centre C et entraînant la verge MQ qui demeure verticale, forme la *manivelle simple*. Le rapport de la vitesse verticale du point M à sa vitesse circulaire varie suivant la position de ce point. Il est zéro en E et F, et 1 en A et B;

nommant x l'angle ACM, ce rapport est en général

$$\frac{d \sin x}{dx} = \cos x.$$

Sa valeur moyenne est $\frac{2}{\pi} = 0,6366$.

La plus grande valeur étant 1, la moyenne est un peu au-dessous des $\frac{2}{3}$ de la plus grande.

La manivelle serait double s'il y avait deux rayons se croisant à angles droits.... Le résultat précédent peut s'y appliquer.

Les trois rayons CM, CM', CM'' (*fig.* 8, *Pl. VIII*) partageant la circonférence en parties égales, assujettis entre eux autour du centre C et entraînant trois verges qui demeurent verticales, forment la *manivelle triple*. Il est utile de connaître le rapport entre la vitesse du point N, milieu de la ligne MM', et la vitesse circulaire de ces points. Ce rapport est le plus grand possible dans le cas de la *fig.* 8 et le plus petit dans le cas de la *fig.* 9, *Pl. VIII*. Il est en général $\frac{1}{2} \cos x$, x représentant l'angle de CN avec CA. Sa valeur moyenne est

$$\frac{1}{2} \frac{6}{\pi} \sin \frac{1}{6} \pi = \frac{1}{2} 0,9548.$$

La plus grande valeur est $\frac{1}{2}$ et la plus petite $\frac{1}{2} \cos \frac{1}{6} \pi$. La valeur moyenne diffère de la plus grande de $\frac{1}{22}$ environ.

La *manivelle quadruple* est formée par quatre rayons se croisant à angles droits. Considérant le point N (*fig.* 10, *Pl. VIII*), milieu de la ligne MM', la vitesse verticale de ce point sera la plus grande possible par rapport à la vitesse circulaire des points M dans le cas de la *fig.* 10, et la plus petite dans le cas de la *fig.* 11, *Pl. VIII*. La valeur moyenne de ce rapport x représentant l'angle de CN avec CA, est

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{4}{\pi} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,6366.$$

La plus grande valeur égale $\frac{1}{\sqrt{2}}$, et la plus petite égale $\frac{1}{2}$; la moyenne diffère de la plus grande de $\frac{1}{10}$ environ.

DES ENGRENAGES.

Les points C, C' (*fig.* 12, *Pl. VIII*) étant les centres de deux roues, le mouvement se transmet généralement, de l'une à l'autre, au moyen de deux portions de courbes Am, A'm, dont l'une pousse l'autre en leur point de contact m. Soit EE' la direction de la normale commune à ces courbes en m. Les vitesses de rotation de chacune des roues seront entre elles réciproquement, comme les distances CE, C'E', ou comme les distances CB, C'B. On peut donc, en déterminant les courbes Am,

A′ m, de manière que dans les diverses sections des roues, le point B tombe en divers endroits de la ligne CC′, régler à volonté le rapport des vitesses respectives de ces roues.

La condition à laquelle on s'assujettit est que le rapport de ces vitesses demeure constant dans toutes les situations des roues; il faut alors que la situation du point B ne change point.

En effet, les courbes A m, A′ m' (*fig.* 13, *Pl. VIII*) étant en contact au point m, si l'on suppose que les cercles tournent d'une quantité infiniment petite, en sorte que le point de contact change et devienne le point m', la normale om' au point m' de la courbe A m dans sa première position, se déplacera d'une quantité infiniment petite et deviendra $o'm'$, en sorte que l'angle formé par om et $o'm'$ sera infiniment petit; l'angle $mo'n$ est infiniment petit du même ordre; d'où il suit que l'angle $no'm'$, qui est la différence de ces deux angles, sera un infiniment petit du cinquième ordre qu'on pourra négliger. Alors le nouveau point de contact m' pourra être considéré comme situé sur la ligne om; pendant le mouvement de rotation infiniment petit, les perpendiculaires CE et C′E′ resteront les mêmes, et les vitesses de rotation de E et E′ seront en raison inverse des perpendiculaires CE, C′E′, puisque le point E aura marché sur EE′ de la même quantité que le point E′.

On a diverses solutions, suivant qu'on se donne à volonté l'une des deux courbes fixées aux cercles :

1°. Si la courbe fixée au cercle dont le centre est C′ se réduit à un point (ce qui est le cas de l'engrenage d'une roue et d'une lanterne), la courbe fixée à l'autre doit être l'épicycloïde que décrirait un point du premier cercle roulant sur le second.

Les deux cercles doivent être tangents pour que l'extrémité A (*fig.* 14, *Pl. VIII*) de la courbe Am, puisse conduire le point m; v et v' étant les vitesses correspondantes à C et C′, on a

$$v : v' :: \frac{1}{\text{CB}} : \frac{1}{\text{C}'\text{B}};$$

mais

$$v : v' :: \frac{\text{AB}}{\text{CB}} : \frac{\text{B}m}{\text{C}'\text{B}}, \quad \text{d'où résulte} \quad \text{AB} = \text{B}m.$$

2°. Si la courbe fixée au cercle dont le centre est C′ (*fig.* 15, *Pl. VIII*) est une ligne droite dirigée suivant les rayons de ce cercle (ce qui est le cas ordinaire de l'engrenage de deux roues), la courbe fixée à l'autre doit être l'épicycloïde que décrirait un point du cercle dont le diamètre est C′B roulant sur le cercle dont le centre est C.

La normale à la courbe AM et à la droite CM passant toujours par le point B, le point M de contact est sur le cercle dont le diamètre est C′B. On a toujours

$$v : v' :: \frac{1}{\text{CB}} : \frac{1}{\text{C}'\text{B}}, \quad v : v' :: \frac{\text{AB}}{\text{CB}} : \frac{\text{B}m}{\text{C}'\text{B}}, \quad \text{d'où AB} = \text{B}m.$$

L'angle en O a pour mesure $\frac{\text{BM}}{\text{BO}}$, l'angle en C′ $\frac{\text{B}m}{2\,\text{BO}}$, et comme $\text{O} = 2\,\text{C}'$, on en conclut BM = AB.

Remarque. — Il convient, dans les applications, que ce soit la roue

qui porte la courbe qui pousse l'autre. Quand chacune des roues doit pousser ou être poussée alternativement, il faut que les dents de chacune portent des parties courbes par lesquelles elles poussent, et des parties droites par lesquelles elles sont poussées. Un engrenage est d'autant plus parfait que les dents sont plus petites et plus multipliées.

Les considérations précédentes s'étendent facilement aux cas où les roues sont dans des plans différents.

Une roue peut faire marcher une verge droite en poussant un point ou une ligne droite perpendiculaire à cette verge. La courbe A*m* (*fig.* 16, *Pl. VIII*) fixée à la roue, doit dans ces deux cas être une portion de la développante du cercle tangent à la direction de la verge. Quand la verge droite doit faire marcher la roue, il faut que cette verge porte des dents, dont les parties courbes, taillées suivant une cycloïde décrite par un point du cercle dont le diamètre est CB, poussent des lignes droites dirigées suivant les rayons de la roue.

Les dispositions précédentes conviennent principalement aux cas où l'on veut que la roue procure à la verge droite un mouvement continu dans le même sens. On veut quelquefois, qu'après avoir poussé la droite, la roue la ramène dans la même direction. Fixant au cercle dont le centre est C (*fig.* 17, *Pl. VIII*) deux portions de courbes tracées suivant la développante de ce cercle, et posées en sens opposés, la verge placée dans la direction B*m* sera poussée et tirée alternativement dans cette direction, à chacun des tours de la roue, et sa vitesse et celle de la roue conserveront toujours le même rapport. Cette disposition est la plus convenable, mais il n'est pas nécessaire que la courbe fixée au cercle en soit la développante. Il suffit que les distances B*m* croissent proportionnellement aux arcs correspondants AB. Et en général, ayant fixé d'avance les espaces à parcourir par les deux points, on déterminera facilement par une simple construction graphique, les courbes par lesquelles le mouvement doit être transmis, pour que ces deux espaces soient parcourus en même temps d'un mouvement uniforme.

DU FROTTEMENT.

Le frottement est la résistance qu'on éprouve, quand on veut faire glisser l'une sur l'autre les surfaces en contact de deux corps. Cette résistance offre diverses variations dont les lois ont été étudiées par l'expérience. Les résultats les plus remarquables obtenus par Coulomb, de l'Académie des Sciences, sont les suivants :

Le frottement des bois glissant à sec sur les bois, oppose, après un temps suffisant de repos, une résistance proportionnelle aux pressions; cette résistance augmente sensiblement dans les premiers instants de repos, mais après quelques minutes elle parvient ordinairement à son maximum ou à sa limite.

Lorsque les bois glissent à sec sur les bois avec une vitesse quelconque, le frottement est encore proportionnel aux pressions; mais son intensité est beaucoup moindre que celle qu'on éprouve en détachant les surfaces après quelques minutes de repos : on trouve, par exemple, que la force nécessaire pour faire glisser et détacher deux surfaces de chêne après quelques minutes de repos, est à celle

nécessaire pour vaincre le frottement, lorsque les surfaces ont déjà un degré de vitesse quelconque, comme 9,5 est à 2,2.

Le frottement des métaux glissant sur les métaux sans enduit est également proportionnel aux pressions, mais son intensité est la même, soit qu'on veuille détacher les surfaces après un temps quelconque de repos, soit qu'on veuille entretenir une vitesse uniforme quelconque.

Les surfaces hétérogènes, telles que les bois et les métaux, glissant l'une sur l'autre sans enduit, donnent pour leurs frottements des résultats très-différents de ceux qui précèdent : car l'intensité de leur frottement, relativement au temps de repos, varie lentement, et ne parvient à la limite qu'après quatre à cinq jours et quelquefois davantage ; au lieu que dans les métaux elle y parvient dans un instant, et dans les bois dans quelques minutes. Cet accroissement est même si lent, que la résistance du frottement dans les vitesses insensibles est presque la même que celle que l'on surmonte en ébranlant ou détachant les surfaces après quelques secondes de repos. De plus, dans les bois glissant sans enduit sur les bois, et dans les métaux glissant sur les métaux, la vitesse n'influe que très-peu sur les frottements ; mais ici le frottement croît très-sensiblement à mesure que l'on augmente les vitesses, en sorte que le frottement varie à très-peu près suivant une progression arithmétique, lorsque les vitesses croissent suivant une progression géométrique.

Il est toujours permis, dans les applications aux machines qui peuvent se présenter, de considérer la résistance du frottement comme composée de deux parties : 1° une partie proportionnelle à la pression et qui est le *frottement* proprement dit ; 2° un partie proportionnelle à l'étendue des surfaces en contact, et qu'on regarde comme provenant de leur adhérence. Les valeurs de ces deux parties peuvent être considérées pour chaque nature de surfaces comme ne variant pas sensiblement avec la vitesse du mouvement. Mais elles ne sont pas les mêmes en général, lorsqu'il s'agit de détacher des surfaces qui ont été en contact pendant quelque temps, ou de continuer un mouvement commencé. On doit aussi distinguer le frottement des surfaces planes de celui des axes dans les mouvements de rotation.

DE LA RAIDEUR DES CORDES.

Une corde passant sur une poulie s'enroule d'un côté et se déroule de l'autre. Son enroulement éprouve une résistance. Il ne paraît pas que son déroulement en éprouve aucune. La résistance à l'enroulement se manifeste, en ce que la corde qui soutient le poids montant Q (*fig.* 18, *Pl. VIII*), n'est pas dirigée suivant la verticale Mq tangente à la poulie, comme l'est la corde qui soutient le poids descendant P. Il en résulte que pour mettre ces deux poids en équilibre, il faut faire P plus grand que Q d'une certaine quantité. Cette quantité est la valeur de la résistance provenant de la raideur.

Les expériences ont appris que cette résistance pouvait se représenter par l'expression

$$\frac{d^u}{D}(a + bQ).$$

On représente par d le diamètre de la corde,
par D le diamètre de la poulie,
par Q le poids qui tend la corde,
et par a, b, u, les constantes à déterminer par expérience pour chaque espèce de cordes.

Les coefficients a et b varient pour chaque espèce de cordes. L'exposant u dépend surtout du degré d'usé des cordes : il varie entre les limites 1 et 2. Il est égal à 2 pour de grosses cordes neuves ; il égale 1,5 pour les cordes plus qu'à demi usées, il égale 1 pour des ficelles très-petites et très-flexibles. Pour les cordes goudronnées, il est plus exact de supposer la raideur proportionnelle au nombre des fils du caret dont elles sont composées, qu'à la quantité d^u. Cette raideur ne varie pas sensiblement pour ces cordes avec leur degré d'usé.

DE L'ÉQUILIBRE DU TREUIL ET DE LA POULIE, EN AYANT ÉGARD AU FROTTEMENT.

Soient A (*fig.* 19, *Pl. VIII*) un tourillon tournant dans le palier MmN, Rm la direction de la résultante des pressions qui s'exercent sur ce tourillon. Par l'effet du mouvement de rotation, le tourillon se place dans le palier, de manière que la tangente Pm au point de contact avec mR fasse un angle égal au complement de l'angle du frottement. f étant le rapport du frottement à la pression, on a

$$\operatorname{tang} PmR = \frac{1}{f}, \quad \sin PmR = \frac{1}{\sqrt{1+f^2}}.$$

La pression normale exercée en m est donc $\frac{R}{\sqrt{1+f^2}}$, et la résistance du frottement dirigée suivant la tangente Pm est $\frac{fR}{\sqrt{1+f^2}}$, laquelle doit être introduite dans le système avec les autres forces qui toutes se font équilibre autour de l'axe A du tourillon (*fig.* 20, *Pl. VIII*), en sorte que c'est le rayon de cet axe qui doit entrer dans l'équation d'équilibre.

Si l'on avait un axe fixe, sur lequel tournât la concavité du trou d'une poulie, les mêmes considérations conduiraient à l'expression de la résistance des frottements, mais il faudrait concevoir l'équilibre établi autour de l'axe A du trou de la poulie, et faire entrer le rayon de ce trou dans l'équation d'équilibre.

L'exemple suivant indiquera comment on calculera l'équilibre dans les machines de rotation.

Considérons un *treuil* dont l'axe est horizontal, servant à lever un poids Q au moyen d'une puissance P tirant une corde passée sur une roue. Nommant (*fig.* 21, *Pl. VIII*) :

R le rayon de la roue ;
r le rayon de l'arbre ;
f, f' les rayons des tourillons A et B;
d le diamètre de la corde soutenant le poids Q;
p la distance mA;
q la distance nA;
l la longueur AB de l'arbre;
λ l'angle de la direction de la force P avec la verticale;

M le poids du treuil et de la roue, dont le centre de gravité est supposé dans l'axe du treuil ;

g la distance de ce centre de gravité au tourillon A ;

N, N' les efforts exercés respectivement sur les tourillons A, B ;

θ, θ' les angles des directions de ces efforts avec la verticale, fa, b θ ayant les mêmes significations que ci-dessus $f' = \frac{1}{\sqrt{1+f^2}}$; on décomposera d'abord toutes les forces en d'autres qui leur soient parallèles, et qui soient appliquées à chaque tourillon ; on décomposera ensuite chaque force fournie par P en deux autres, l'une horizontale et l'autre verticale. On aura ainsi :

Force verticale appliquée en A :

$$M\frac{l-g}{l} + Q\left(\frac{l-q}{l}\right) + P\left(\frac{l-p}{l}\right)\cos\lambda;$$

Force horizontale appliquée en A :

$$P\left(\frac{l-p}{l}\right)\sin\lambda;$$

Force verticale appliquée en B :

$$M\frac{g}{l} + Q \times \frac{q}{l} + P\frac{p}{l}\cos\lambda;$$

Force horizontale appliquée en B :

$$P\frac{p}{l}\sin\lambda;$$

d'où

$$N = \frac{1}{l}\sqrt{[M(l-g)+Q(l-q)]^2 + 2[M(l-g)+Q(l-q)]P(l-p)\cos\lambda + p^2(l-p)^2},$$

$$N' = \frac{1}{l}\sqrt{(Mg+Qq)^2 + 2(Mg-Qq)Pl\cos\lambda + P^2p^2},$$

$$\sin\theta = \frac{P(l-p)\sin\lambda}{Nl},$$

$$\sin\theta' = \frac{Pp\sin\lambda}{N'l}.$$

On exprime ensuite l'équilibre du treuil en posant l'équation

$$PR = Qr + f'(N\rho + N'\rho') + \frac{d^n}{2r}(a+bQ),$$

laquelle donnera la valeur de P, après qu'on aura remplacé N et N' par les expressions précédentes. Ces formules se simplifient quand, les rayons ρ et ρ' des deux tourillons étant égaux, on peut se dispenser, pour évaluer l'effet du frottement, de calculer séparément les pressions N et N'. La somme de ces pressions est

$$N + N' = \sqrt{(M+Q)^2 + 2(M+Q)P\cos\lambda + P^2};$$

on a alors pour l'équation d'équilibre,

$$PR = Qr + f'\rho\sqrt{(M+Q)^2 + 2(M+Q)P\cos\lambda + P^2} + \frac{d^n}{2r}(a+bQ).$$

On aura le cas où la force P serait verticale en faisant $\cos\lambda = 1$, ce qui donne

$$PR = Qr + f'\rho(M + Q + P) + \frac{d^u}{2r}(a + bQ).$$

Les formules précédentes conviendront au cas d'une poulie en supposant $r = R$. On abrége beaucoup la résolution des équations précédentes, en mettant pour P, sous le radical du deuxième membre, une première valeur approchée, calculée en négligeant l'effet du frottement, laquelle est $P = \frac{1}{R}\left[Qr + \frac{d^u}{2r}(a + bQ)\right]$. Si la valeur de P, trouvée de cette manière, ne paraît pas suffisamment exacte, on peut en calculer une autre en mettant la première sous le radical.

Les formules précédentes peuvent s'appliquer au cas d'un cabestan dont l'axe est vertical, la corde exerçant l'effort Q étant dirigée horizontalement. Dans ce cas, l'effort P représente ordinairement la somme de plusieurs puissances, dont les points d'application doivent être distribués symétriquement autour de l'axe de rotation. Il résulte de cette disposition que les puissances n'exercent aucun effort sur les points d'appui dans cet axe, et qu'on doit faire $P = 0$ dans le terme affecté de f.

DES MOUFLES.

Les considérations précédentes conduisent aux formules suivantes pour le calcul des moufles. Supposant les poulies égales et les cordes parallèles, puis nommant (*fig.* 22, *Pl. VIII*) $T, T_1, T_2, T_3, \ldots, T_n$ la tension des cordes, P la puissance qui soulève le poids égal à la tension T_n de la dernière corde, Q le poids soulevé, égal à la somme des tensions des cordes passant sur les poulies mobiles, r le rayon des poulies, ρ celui des trous des poulies, d le diamètre de la corde, f', a, b, u ayant les mêmes significations que ci-dessus, on aura d'abord

$$T_1 r = Tr + f'\rho(T + T_1) + \frac{d^u}{2r}(a + bT),$$

d'où

$$T_1 = T\frac{r + f'\rho}{r - f'\rho} + \frac{d^u}{2r}(a + bT);$$

en faisant, pour abréger,

$$\alpha = \frac{d^u a}{2r}; \quad \beta = \frac{r + f'\rho}{r - f'\rho} + \frac{d^u b}{2r},$$

on a

$$T_1 = \alpha + \beta T.$$

On a également

$$T_2 = \alpha + \beta T_1 = \alpha(1 + \beta) + \beta^2 T,$$
$$T_3 = \alpha + \beta T_2 = \alpha(1 + \beta + \beta^2) + \beta^3 T,$$
$$T_n = \alpha + \beta T_n = \alpha(1 + \beta + \beta^2 + \beta^{n-1}) + \ldots + \beta^n T = P.$$

Ajoutant toutes ces équations, la somme des premiers membres est égale à Q et il vient

$$Q = \alpha\left[\frac{\beta^{n+1} - 1}{(\beta - 1)^2} - \frac{n + 1}{\beta - 1}\right] + \frac{b^{n+1} - 1}{\beta - 1}T.$$

Tirant la valeur de T et substituant dans celle de P, on a

$$P = \alpha\left[\frac{(n+1)\beta^n}{\beta^{n+1}-1} - \frac{1}{\beta-1}\right] + \frac{(\beta-1)\beta^n}{\beta^{n+1}-1}Q.$$

Le principe des moufles a été remarqué par Euler. Si un poids est attaché à une moufle mobile à laquelle aboutissent n cordons, la puissance appliquée à l'extrémité du dernier cordon, laquelle fait équilibre au poids, est à lui dans le rapport de 1 à n, proposition évidente par elle-même.

On peut déduire immédiatement de ce principe celui du levier.

Mais le principal avantage de la considération d'un système de moufles est de fournir une démonstration immédiate du principe des *vitesses virtuelles*, démonstration donnée par Lagrange. Ce dernier principe consiste en ce que, si plusieurs forces se font équilibre sur un système, il faut qu'en faisant éprouver au système tous les déplacements infiniment petits possibles, et formant le produit de chaque force par le déplacement qu'a éprouvé son point d'application, estimé dans le sens de la force, la somme de ces produits soit toujours nulle ou négative.

Les produits dont il s'agit se nomment les *moments* des forces, et on les regarde comme positifs quand le point d'application est déplacé dans le sens de l'action de la force, et comme négatifs quand ce point est déplacé en sens contraire

En généralisant le théorème de Stevin sur la composition des forces, on reconnaît que pour des forces quelconques appliquées à un même point, la somme des moments des composantes est égal au moment de la résultante.

DE LA CHAINE.

Lorsque le poids soulevé est supporté par une chaîne et non par une corde, la flexion de la chaîne fait naître un frottement, dont l'effet s'évalue comme il suit : Considérant une chaîne de l'espèce connue sous le nom de *chaîne de montre,* employée ordinairement dans les machines, on remarque qu'il s'exerce en a et b (*fig.* 23, *Pl. VIII*), sur les axes des chaînons, des efforts P et Q, lesquels font naître des frottements $f'P$ et $f'Q$. Ces frottements sont des forces agissant tangentiellement à la surface concave du trou du chaînon, en sens contraire du mouvement de la poulie. Soient R le rayon de la poulie, r le rayon du trou des chaînons, et remarquant que quand la chaîne se plie en b et se redresse en a, les chaînons décrivent, en tournant sur leurs axes, des angles égaux à ceux que décrit la poulie sur le sien, on aura donc, par le principe des vitesses virtuelles, pour exprimer l'équilibre de la poulie,

$$PR = QR + f'(Pr + Qr), \quad \text{d'où} \quad P = Q\frac{R+f'r}{R-f'r}.$$

DU FROTTEMENT DES ENGRENAGES.

Soit une roue dont le centre est C (*fig.* 24, *Pl. IX*), qui en conduit une autre dont le centre est C'; supposons l'engrenage formé d'après les conditions énoncées précédemment. La normale mn menée au point de contact des deux courbes par lesquelles les roues se conduisent, pas-

sera toujours par le point A. Soient x l'angle variable $AC'm$, r le rayon CA, r' le rayon C'A, P l'effort qui agit à la circonférence de la roue dont le centre est C, f le rapport du frottement à la pression.

L'effort P produira en m une pression qui, avec le bras de levier Cn, devra faire équilibre à P avec le bras de levier CA. Cette pression sera donc $= \frac{P}{\cos x}$, et, par conséquent, la résistance provenant du frottement qui agit en m suivant mC' sera $\frac{fP}{\cos x}$.

La distance de la direction de cette force au centre C étant $CO = (r + r') \sin x$, l'effet de la résistance provenant du frottement est de réduire le moment Pr de la force P pour faire tourner les roues à

$$P \frac{[r - f(r + r') \sin x]}{\cos x}.$$

Cette quantité varie avec l'angle x. La valeur moyenne du facteur $\frac{\sin x}{\cos x}$ est $-\frac{\log \cos \bar{x}}{\bar{x}}$, en supposant que la dent qui conduit commence à pousser dans la ligne des centres, et cesse de pousser quand l'angle x a acquis la valeur $\bar{x}$. La valeur moyenne de l'expression précédente est donc

$$P \frac{[(r + f(r + r') \log \cos \bar{x}]}{\bar{x}}.$$

Si la dent qui conduit commençait à pousser avant la ligne des centres, on aurait à calculer une valeur moyenne, analogue à la précédente pour cette partie de la course de la dent. Ce serait alors le flanc de la dent appartenant à la roue dont le centre est C qui pousserait la courbe de l'autre dent. Soit $\underline{x}$ l'angle que le flanc forme avec CA, à l'instant où il commence à pousser, la valeur moyenne du moment de P, pour cette partie de la course de la dent, serait

$$P \frac{[r + f(r + r') \log \cos \underline{x}]}{\underline{x}}.$$

Pour avoir maintenant la moyenne définitive, on remarquera qu'avant que la dent qui conduit ait atteint la ligne des centres, elle a décrit l'angle $\underline{x}$, et qu'après avoir dépassé cette ligne, elle a décrit l'angle $\bar{x}\frac{r'}{r}$. Il en résulte que cette moyenne définitive est exprimée par

$$P \left[r + f(r + r') \frac{r' \log \cos \bar{x} + r \log \cos \underline{x}}{r'\bar{x} + r\underline{x}} \right],$$

quantité qu'il faudra substituer à Pr en établissant l'équation d'équilibre d'une machine, quand on voudra avoir égard au frottement des engrenages. L'effet de ce frottement sera d'autant plus sensible que les rayons des roues seront plus grands et les dents plus grosses. Les résultats précédents conviennent également au cas de l'engrenage de deux roues dentées et à celui d'une roue avec une lanterne.

DES CAMES.

S'il s'agit d'une came conduisant un pilon, on doit faire dans la formule précédente $\bar{x} = 0$, $x = 0$ et $r = \infty$. Elle ne donne plus de résultat immédiat. Mais soit alors h la distance variable mA (*fig.* 25, *Pl. IX*), on a, pour le moment de P modifié par l'effet du frottement,

$$P(r - fh),$$

dont la valeur moyenne est $P\left(r - \frac{1}{2}f\bar{h}\right)$, $\bar{h}$ représentant la valeur de h, à l'instant où la came abandonne le mentonnet du pilon.

Dans ce dernier engrenage, un même point du mentonnet se trouvant successivement en contact avec différents points de la came, le frottement est du même genre que celui de deux surfaces glissant l'une sur l'autre. Cette circonstance n'a pas lieu pour tout autre engrenage, où le contact s'établissant successivement entre différents points des courbes qui agissent les unes sur les autres, le frottement est intermédiaire entre le frottement qui a lieu dans un glissement et celui qui a lieu dans un roulement d'une surface courbe sur une autre. De cette circonstance et de la petitesse du terme soustractif introduit dans les formules précédentes, il résulte qu'on peut, en général, négliger la considération du frottement des engrenages dans le calcul des machines.

DE L'ÉQUILIBRE DE LA VIS.

On considérera seulement une vis à filets carrés. Supposant l'écrou immobile, la vis mobile et chargée d'un poids, ce poids sera dans le même cas que s'il était posé sur un plan incliné, et l'on aura pour l'expression de l'équilibre, en supposant l'axe de la vis vertical,

$$P = \frac{r}{r'} Q \frac{\sin\alpha \pm f\cos\alpha}{\cos\alpha \mp f\sin\alpha}.$$

P représente la force appliquée à l'écrou au bout du rayon r'; r le rayon de la vis pris au milieu du filet; Q le poids dont la vis est chargée; α l'angle de l'hélice du filet avec l'axe de la vis; f le rapport du frottement à la pression.

Cependant cette formule n'est qu'approchée.

TRAVAIL D'UNE FORCE. — FORCE VIVE.

On a donné le nom de *travail d'une force* au produit de cette force par le chemin parcouru par son point d'application, lorsqu'il est déplacé suivant la direction de cette force. Pour faire comprendre cette définition, supposons que l'on emploie des hommes à élever directement, d'un mouvement uniforme, du minerai du fond d'un puits à la surface du sol; il est évident que chacun de ces hommes fera constamment un même effort égal au poids du corps qu'il élève; le temps pendant lequel il devra être employé sera évidemment proportionnel au poids total que l'on veut qu'il élève, et à la hauteur dont il aura été élevé. Ainsi, ce que l'on appelle vulgairement le travail de chacun de ces hommes, sera une quantité proportionnelle à ce poids et à la hauteur, c'est-à-dire à la force verticale qui agit, et à la quantité dont s'élève son point d'application.

En examinant le cas le moins simple où le point d'application de

la force ne se meut pas dans la direction de cette force, on a reconnu que l'utilité produite et la dépense occasionnée sont proportionnelles au produit de la force par le chemin parcouru par son point d'application dans le sens de la force, ou, en d'autres termes, par la projection de ce chemin sur la direction de la force. C'est à ce produit qu'on a donné généralement le nom de *travail de la force.*

Unité de travail. — Le travail sera mesuré par le nombre 1 lorsque la force sera égale à l'unité et que son point d'application se déplacera d'une longueur égale à l'unité dans le sens de la force. Ainsi l'unité de travail est le travail correspondant à un poids de 1 kilogramme élevé verticalement de 1 mètre. La quantité de travail d'une force est regardée comme positive lorsque la projection du déplacement du point est dans la direction de la force, ou lorsque le déplacement fait un angle aigu avec cette direction. Il est négatif dans le cas contraire, qui est celui de l'angle obtus; il est nul si l'angle est droit, c'est-à-dire si le point ne se meut ni dans le sens de la force ni en sens contraire.

Si la force n'est pas constante, il faut, pour calculer le travail produit d'après la définition précédente, partager le mouvement en intervalles infiniment petits, pendant chacun desquels la force pourra être considérée comme constante, et le travail total sera la somme des *quantités élémentaires de travail.*

Énoncé du principe des vitesses virtuelles. — Le moment virtuel d'une force ne diffère pas de la quantité de travail élémentaire de cette force correspondante au déplacement virtuel de son point d'application. On peut donc énoncer de cette manière le principe des vitesses virtuelles :

Lorsqu'un système quelconque de points est en équilibre, la somme algébrique des quantités de travail de toutes les forces est nulle pour tout déplacement infiniment petit, compatible avec les liaisons du système; et réciproquement, si cette somme est nulle pour tout déplacement possible, le système est en équilibre.

Travail de la résultante de forces quelconques. — Lorsque des forces appliquées à un système rigide ont une résultante, elles se trouveraient en équilibre si l'on introduisait une force égale et opposée à cette dernière. La somme des quantités de travail virtuelles serait donc nulle, et par conséquent le travail virtuel de la force introduite est égal, au signe près, à la somme de ceux qui correspondent aux forces données. Et comme cette force et la résultante, étant égales et contraires, donnent des quantités de travail égales et de signes contraires, on arrive à cette conséquence :

Le travail de la résultante de forces appliquées à un système rigide quelconque, est égal à la somme des travaux des composantes pour tout déplacement infiniment petit de ce système.

Dans cet énoncé, les forces sont considérées comme nécessairement positives, mais, comme il est souvent utile d'introduire les composantes des forces parallèlement aux axes de coordonnées, on a alors à traiter des forces positives ou négatives. La quantité élémentaire de travail, positive ou négative d'une force qui a pour composantes X, Y, Z, sera

$$X\,dx + Y\,dy + Z\,dz,$$

dx, dy, dz étant les composantes positives ou négatives du déplacement du point d'application de cette force.

Force vive. — Considérons d'abord le mouvement rectiligne d'un point ayant pour masse m, et soumis à l'action d'une force motrice F; on aura l'équation

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=\mathrm{F}.$$

Le travail élémentaire de cette force correspondant à l'espace parcouru dx est $\mathrm{F}dx$, et l'équation précédente donne

$$\mathrm{F}dx=m\frac{d^2x}{dt^2}dx=\frac{1}{2}dmv^2,$$

v désignant toujours la vitesse ou $\frac{dx}{dt}$. On voit donc que l'accroissement infiniment petit du travail de la force est égal à la moitié de l'accroisement de la quantité mv^2. On a donné à cette quantité mv^2, le nom de *force vive* du mobile. Cette dénomination est impropre, puisque le produit d'une masse par le carré d'une vitesse n'a aucun rapport avec la mesure d'une force; mais nous la conserverons pour éviter les inconvénients attachés au changement de nom, et parce que d'ailleurs elle ne peut induire en erreur, dès qu'on s'est bien entendu sur sa signification.

L'équation ci-dessus peut s'énoncer de la manière suivante :

Dans le mouvement rectiligne d'un point libre, le travail élémentaire de la force qui agit sur lui est égal à la moitié de l'accroissement correspondant de la force vive de ce mobile.

Relation entre la force vive et le travail, dans le mouvement général d'un point. — Supposons le point libre et sollicité par une force motrice F dont les composantes parallèles aux axes soient X, Y, Z; les équations de son mouvement seront, en désignant par m sa masse,

$$(1)\qquad m\frac{d^2x}{dt^2}=\mathrm{X},\quad m\frac{d^2y}{dt^2}=\mathrm{Y},\quad m\frac{d^2z}{dt^2}=\mathrm{Z}.$$

Or, d'après ce qui vient d'être démontré, le travail de la force F, pour un déplacement ayant pour composantes dx, dy, dz, est

$$\mathrm{X}dx+\mathrm{Y}dy+\mathrm{Z}dz,$$

expression que l'on obtiendra en ajoutant les équations (1), après avoir multiplié la première par dx, la seconde par dy et la troisième par dz. On trouve ainsi

$$\mathrm{X}dx+\mathrm{Y}dy+\mathrm{Z}dz=m\left(\frac{d^2x}{dt^2}dx+\frac{d^2y}{dt^2}dy+\frac{d^2z}{dt^2}dz\right),$$

ou

$$(2)\qquad \mathrm{X}dx+\mathrm{Y}dy+\mathrm{Z}dz=\frac{1}{2}dmv^2.$$

Le premier membre est le travail de la force F, ou la somme algébrique des quantités de travail des forces dont F serait la résultante; l'équation (2) exprime donc le théorème suivant :

Dans le mouvement d'un point libre, la somme des quantités élementaires de travail, relatives aux différentes forces qui y sont

appliquées, est égale à la moitié de l'accroissement correspondant de la force vive du mobile.

Cette égalité ayant lieu pour tout intervalle infiniment petit, a lieu pour une somme quelconque d'intervalles, et par conséquent pour un intervalle fini, ce qui donne la proposition suivante :

La somme des quantités de travail des différentes forces appliquées à un point matériel libre, pendant un temps fini quelconque, est égale à la moitié de l'accroissement de la force vive de ce point, dans ce même intervalle.

Mouvement produit par une force constante.

On entend par force constante, celle qui exerce la même action sur le corps auquel elle est appliquée, quel que soit le mouvement de ce corps. Cela posé, considérons un point matériel ayant d'abord un mouvement rectiligne et uniforme. Si on lui applique une force constante dans le sens de son mouvement, sa vitesse augmentera de quantités égales dans des temps égaux quelconques, puisque l'accroissement de vitesse est indépendante de la vitesse précédemment acquise. Ainsi, le mouvement rectiligne d'un point sollicité par une force constante, et partant avec une vitesse initiale quelconque, est tel, que la vitesse croît de quantités proportionnelles au temps. On voit de la même manière que, si la force était en sens contraire du mouvement initial, la vitessse diminuerait proportionnellement au temps, et, à partir de l'instant où elle serait annulée, le mouvement changerait de sens, et la variation de la vitesse serait toujours la même qu'auparavant dans des temps égaux.

Une force constante produit donc le mouvement que nous avons nommé *uniformément varié*. En désignant par v la vitesse positive ou négative du point, pour une valeur quelconque du temps t; par b la vitesse initiale, c'est-à-dire correspondante à $t=0$; enfin, par a l'accélération, positive ou négative, produite par l'action de la force sur le point matériel, on aura

$$v = at + b = \frac{dx}{dt} \quad \text{et} \quad x = \frac{at^2}{2} + bt + c,$$

c désignant la valeur initiale de x et déterminant par conséquent la position initiale du mobile.

Si un point matériel est animé d'un mouvement uniformément varié, il est nécessairement sollicité par une force constante.

En effet, si la force, au lieu d'être constante, augmentait ou diminuait d'une manière continue, on pourrait regarder comme évident que la vitesse ne croîtrait plus de quantités égales dans des temps égaux, comme dans le cas où la force était toujours la même.

Si deux points ayant des masses égales partent du repos et sont sollicités par des forces égales et parallèles, ils prendront un mouvement identique, et, par conséquent, on ne changera rien à leur état, en supposant qu'ils soient liés invariablement l'un à l'autre, et que leur système soit sollicité par la force double qui est la résultante des deux autres, et, par conséquent, appliquée au centre de gravité des deux points. Il en serait de même pour un nombre quelconque de points, de sorte que si deux masses sont dans le rapport de m à n, et qu'elles soient sollicitées par des forces dans le même rapport ap-

pliquées à leurs centres de gravité respectifs, elles prendront des mouvements identiques, et tous leurs points décriront des droites parallèles.

Si l'une des masses était sollicitée par une force moindre ou plus grande que celle qui résulte de cette proportion, elle aurait évidemment un mouvement différent de l'autre. D'où résulte cette réciproque, que si deux masses inégales ont un même mouvement, les forces qui leur sont appliquées sont proportionnelles à ces masses.

Application de ce qui précède à la pesanteur. — L'expérience a appris que tous les corps abandonnés dans le vide à la libre action de la pesanteur, prennent des mouvements identiques, quelles que soient leur grandeur, leur espèce et par conséquent leur masse. On doit conclure de là que les forces respectives auxquelles tous les corps sont soumis, pendant leur mouvement, par l'action de la pesanteur, ou les poids de ces corps, sont proportionnelles aux masses de ces corps.

Proportionnalité de la vitesse à la force.

Ce principe fondamental consiste en ce que deux forces constantes quelconques qui sollicitent des masses égales pendant un même temps, leur font acquérir des vitesses qui sont entre elles dans le même rapport que les deux forces.

Rappelons d'abord le principe que le mouvement rectiligne et uniforme, commun à un système de points, n'influe pas sur le mouvement relatif, produit par une force particulière qui agit sur l'un d'eux; d'après cela, en regardant les points soumis aux expériences comme ayant une vitesse commune constante en grandeur et en direction, nous pourrons supposer la terre immobile quand il s'agira d'étudier les mouvements absolus que produiraient diverses forces sur des corps situés à sa surface; car le mouvement relatif qu'on observera ne différera pas du mouvement absolu qui serait produit par ces mêmes forces agissant seules sur les mêmes corps partant de l'état de repos.

Pour étudier la loi suivant laquelle varie le mouvement d'une même masse, sollicitée successivement par diverses forces constantes, et partant toujours de l'état de repos, on peut faire usage d'appareils analogues à la machine d'Atwood, et qui donnent le moyen de faire varier d'une infinité de manières la force appliquée à une même masse, et de mesurer avec une grande précision la vitesse acquise après l'unité de temps. Il sera facile alors de déterminer la loi suivant laquelle cette vitesse varie avec la force qui la produit.

Désignons par M la masse de l'un quelconque des poids égaux primitivement en équilibre sur la machine, et par m la masse du poids additionnel p. Tous les points du système ayant le même mouvement, des masses égales sont sollicitées par des forces égales; ainsi une masse égale à m ne sera plus sollicitée par la force p, mais par la force $p\,\frac{m}{2M+m}$ ou $\frac{p}{1+2\frac{M}{m}}$; et l'on peut choisir le rapport $\frac{M}{m}$ de manière que la masse m soit sollicitée par une force ayant une valeur quelconque comprise entre zéro et p. Or, en déterminant les vitesses acquises dans chaque cas après une seconde, comme on peut le faire par des procédés très-précis, on les trouvera dans le même rapport que les forces,

avec d'autant plus d'approximation, que l'on aura plus diminué les résistances étrangères.

On peut même s'assurer que la force appliquée à la masse 2 M est constante pendant le mouvement. Il suffira de suspendre le poids additionnel au moyen d'un ressort qui en fasse partie, ou qui soit compris dans l'une des masses en équilibre. On reconnaîtra qu'il est toujours également tendu pendant le mouvement, et, par conséquent, la force avec laquelle la masse 2 M est tirée, est constante. Sa valeur indiquée par l'allongement du ressort, étant divisée par $\frac{2\,\mathrm{M}}{m}$, donnera la force appliquée à la masse m, et devra coïncider avec celle que nous avions trouvée, savoir $\frac{p}{1+2\frac{\mathrm{M}}{m}}$.

Comparaison des forces qui agissent sur des masses quelconques.

Si l'on applique une force constante p à un corps ayant une masse m, chaque unité de masse est sollicitée par la force $\frac{p}{m}$. Si l'on conçoit une seconde force constante p' appliquée à une masse m', l'unité de masse de ce nouveau corps est sollicitée par la force $\frac{p'}{m'}$.

Les mouvements de ces deux corps étant évidemment les mêmes que ceux de chacune de leurs parties, et les vitesses acquises au bout du même temps par des masses égales étant proportionnelles aux forces qui les produisent, si l'on désigne ces vitesses par v et v', on aura

$$v : v' :: \frac{p}{m} : \frac{p'}{m'} \quad \text{ou} \quad p : p' :: mv : m'v';$$

d'où il résulte que deux forces constantes sont entre elles comme les produits des masses auxquelles elles sont appliquées par les vitesses qu'elles leur font acquérir dans le même temps.

La proportion précédente peut se mettre sous la forme

$$\frac{p}{p'} = \frac{mv}{m'v'};$$

si donc on prend pour unités de leurs espèces respectives les quantités désignées par p', m', v', on aura $p = mv$.

Ainsi les forces seront mesurées par le produit de la masse du corps auquel elles sont appliquées par la vitesse qu'elles lui feront acquérir pendant l'unité de temps, en entendant que l'on a pris pour unité de force celle qui fait acquérir à l'unité de masse, dans l'unité de temps, une vitesse égale à l'unité de longueur.

Si l'on voulait comparer les intensités de deux forces p et p' qui, dans des temps différents t et t', auraient fait acquérir des vitesses v et v' aux masses m et m', il faudrait ramener les temps à être égaux, par exemple à l'unité, avant d'y appliquer la proposition précédente. Or la masse m aurait acquis la vitesse $\frac{v}{t}$ dans le temps de t, et la masse m' la vitesse $\frac{v'}{t'}$; on aura par conséquent $p : p' :: \frac{mv}{t} : \frac{m'v'}{t'}$, et si l'on

suppose que p', m', v', t' soient tous égaux à l'unité, on aura

$$p = \frac{mv}{t},$$

l'unité de force étant la même que dans le cas précédent.

Quantité de mouvement d'un corps. — On appelle *quantité de mouvement d'un corps*, le produit de sa masse par sa vitesse. On peut donc dire qu'une force constante quelconque est mesurée par la quantité de mouvement qu'elle produit dans l'unité de temps.

Unités de force et de masse. — On est convenu de prendre pour unité de force le kilogramme, c'est-à-dire le poids d'un décimètre cube d'eau distillée et ramenée à son maximum de densité. D'après cela, l'unité de masse sera la masse qui, sollicitée pendant une seconde par une force constante égale au poids de 1 kilogramme, acquerrait une vitesse de 1 mètre par seconde.

Or la masse de 1 décimètre cube d'eau distillée par une force égale à 1 kilogramme, acquiert la vitesse g dans une seconde; donc la masse d'un nombre g de décimètres cubes d'eau, sollicitée par la même force de 1 kilogramme, acquerrait une vitesse égale à l'unité; elle est donc l'unité de masse.

Ainsi, en prenant la seconde pour unité de temps, le mètre pour unité de longueur et le kilogramme pour unité de force, la masse prise pour unité doit être celle de 9,80896 décimètres cubes d'eau distillée.

Les masses pourront donc être remplacées par des poids, ce qui est plus commode, puisque ce sont les poids qui se mesurent immédiatement avec les instruments. On observera pour cela que si P désigne le poids du corps dont la masse est m, on aura $P = mg$, puisque g unités de force expriment le poids de l'unité de masse; on en tire $m = \frac{P}{g}$; mais il ne faudra pas oublier que tout se rapporte au système d'unités que nous venons d'établir.

Travail des forces mouvantes et résistantes.

Une quantité qui entre dans les théorèmes les plus importants de la mécanique, et surtout dans la théorie dynamique des machines, résulte de la combinaison des forces et des chemins que parcourent leurs points d'application.

Un point étant en mouvement en vertu de causes quelconques, considérons à part l'une des forces qui peuvent être appliquées simultanément à ce point et l'accompagner dans son déplacement; puis représentons par F l'intensité de cette force exprimée en kilogrammes, et considérée comme constante pendant un temps infiniment petit; par ds le chemin infiniment petit parcouru pendant ce temps par le point d'application de la force; par $\cos(F, ds)$ le cosinus de l'angle de F avec ds, c'est-à-dire de l'angle que forment la force et le chemin parcouru, considéré comme se confondant avec sa tangente dans le sens du mouvement. Cela posé, nous appellerons travail élémentaire de la force F, dans l'étendue du chemin ds le produit infiniment petit $F \times ds \times \cos(F, ds)$.

Ce produit de trois facteurs peut être considéré de deux manières différentes, comme le produit d'une force par une longueur infiniment petite :

1°. Mis sous la forme $F[ds \times \cos(F, ds)]$ le travail élémentaire de la force F est le produit de cette force par la projection orthogonale $ds \times \cos(F, ds)$ du chemin ds sur la direction de la force.

2°. Mis sous la forme $ds \times [F \times \cos(F, ds)]$, le travail élémentaire de la force F est le produit du chemin ds par la projection orthogonale de la force sur la tangente, prolongement de ds dans le sens du mouvement.

Et si nous représentons le travail de la force par $\mathfrak{T}F$, nous résumerons cette définition par la formule

$$d \times \mathfrak{T}F = F\,ds \cos(F, ds).$$

Dans les définition et formule qui précèdent, la force F et le chemin ds sont des quantités positives, tandis que le facteur numérique $\cos(F, ds)$ est positif ou négatif selon que l'angle de F avec ds est plus petit ou plus grand qu'un angle droit.

Le travail positif s'appelle *travail moteur*, et le travail négatif s'appelle *travail résistant*. Les forces dont le travail est moteur s'appellent *forces mouvantes*, et celles dont le travail est résistant s'appellent *forces résistantes*.

Quand les directions des forces font des angles aigus avec la direction du mouvement de leurs points d'application, les forces sont mouvantes; elles sont résistantes quand les angles sont obtus.

Quand la force et le chemin élémentaire sont suivant la même droite, le cosinus devient $+1$ ou -1, et le travail élémentaire est le produit de la force par le chemin, produit positif ou négatif selon que la force et le chemin sont de même sens ou de sens contraire.

Lorsqu'une force, accompagnant son point d'application dans son mouvement, reste normale à la ligne décrite, le cosinus est zéro et le travail de cette force est nul.

Si une force d'intensité constante fait continuellement le même angle avec le chemin élémentaire ds parcouru, le travail est égal au produit du chemin total multiplié par la projection rectangulaire de la force sur la tangente au chemin: projection positive ou négative suivant que le sens de la force et celui du chemin forment un angle aigu ou un angle obtus.

Dans la pratique, l'unité de travail répond à une force de 1 kilogramme agissant dans l'étendue d'un mètre, la force et le chemin ayant la même direction; cette unité s'appelle *kilogrammètre*. La quantité de travail exprimée par 1000 kilogrammètres s'appelle *dynamode*.

Le travail d'une force pour un parcours déterminé de son point d'application est indépendant du temps, c'est-à-dire de la durée de ce parcours. Mais dans la mécanique pratique on a quelquefois besoin de désigner un travail indéfiniment prolongé et qui conserve des valeurs égales pendant des temps égaux. On pourrait prendre pour unité de travail indéfiniment prolongé un kilogrammètre par seconde; mais dans l'industrie on fait souvent usage d'une autre unité. On s'accorde assez généralement en France pour admettre, comme terme de comparaison, un travail continu de 75 kilogrammètres par seconde, que nous appellerons, comme plusieurs auteurs, *cheval vapeur, cheval dynamique*.

Il ne faut pas confondre l'idée simple de *force* avec l'idée complexe de *travail*; une force s'exprime en kilogrammes; un travail ou une puissance mécanique s'exprime en kilogrammètres. Nous pourrons, par conséquent, dire un travail de dix chevaux, et nous devrons éviter de parler d'une force de dix chevaux.

De l'homme et du cheval.

Les lois auxquelles est soumise l'action des animaux ne peuvent être connues que par l'observation. Cette action est sujette à varier d'après beaucoup de circonstances. Les observations connues ne sont ni assez suivies, ni assez multipliées pour établir exactement les relations des facteurs du produit qui en donne l'expression. Ces observations établissent toutefois un fait général qui consiste en ce que la quantité d'actions journalières, que peut fournir un animal, varie avec la nature du travail qu'il fait. Des travaux différents peuvent, la quantité d'actions journalières produites demeurant la même, ne pas causer le même degré de fatigue. Le rapprochement des faits observés dans la conduite des grandes constructions, ou obtenus par des expériences spéciales, a permis d'établir l'expression numérique des quantités d'actions journalières produites par l'homme et le cheval dans divers travaux. Ces résultats ne doivent être considérés que comme offrant des termes moyens, à partir desquels diverses circonstances et surtout les inégalités qu'on observe dans les forces des individus, peuvent causer d'assez grands écarts.

On a cherché, par des considérations hypothétiques, à déduire les valeurs des éléments qui sont propres à remplir cette condition de l'observation des efforts et des vitesses extrêmes que pouvaient prendre les animaux. Nommant

v la vitesse que l'homme peut prendre quand il n'exerce aucun effort,
V la vitesse avec laquelle il travaille,
p l'effort qu'il peut exercer quand il ne prend aucune vitesse,
P l'effort qu'il exerce en travaillant,

on aura la relation

$$P = p\left(1 - \frac{V}{v}\right)^2 \quad \text{d'où} \quad PV = p\left(1 - \frac{V}{v}\right)^2 V.$$

La valeur maximum de PV aurait alors lieu quand on aurait $V = \frac{1}{3}v$; $P = \frac{4p}{9}$, et serait $\frac{4}{27}pv$.

Coulomb a aussi supposé que l'homme, marchant horizontalement ou montant chargé d'un fardeau, éprouvait, dans la quantité d'action journalière qu'il fournissait, une diminution proportionnelle au fardeau dont il était chargé. La relation entre P et V, à laquelle conduit cette hypothèse, donne des résultats qui ne diffèrent pas notablement de ceux de la formule précédente.

TABLEAU des quantités d'action que peuvent fournir moyennement l'homme et le cheval dans divers genres de travaux.

NATURE DU TRAVAIL.	POIDS transporté ou effort exercé.	VITESSE par seconde.	QUANTITÉ d'action par seconde.	DURÉE du travail journalier.	QUANTITÉ d'action journalière.
1°. TRANSPORT HORIZONTAL DES POIDS.	kilogr	mètres	kil × mèt	heures	kil × mèt
Un homme marchant sur un chemin horizontal, sans fardeau, son travail consistant dans le transport du poids de son corps	65	1,5	97,5	10	3510000
Un manœuvre transportant des matériaux dans une petite charrette ou camion à deux roues, et revenant à vide chercher de nouvelles charges	100	0,5	50	10	1800000
Un manœuvre transportant des matériaux dans une brouette, et revenant à vide chercher de nouvelles charges	60	0,5	30	10	1080000
Un homme voyageant et portant des fardeaux sur son dos	40	0,75	30	7	756000
Un manœuvre transportant des matériaux sur son dos, et revenant à vide chercher de nouvelles charges	65	0,5	32,5	6	702000
Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, et marchant au pas continuellement chargé	700	1,1	770	10	27720000
Un cheval attelé à une voiture et marchant au trot continuellement chargé	350	2,2	770	4,5	12474000
Un cheval portant des fardeaux sur une charrette, au pas, et revenant à vide chercher de nouvelles charges	700	0,6	420	10	15120000
Un cheval chargé sur son dos, allant au pas	120	1,1	132	10	4752000
Un cheval chargé sur son dos, allant au trot	80	2,2	176	7	4435200
2°. ÉLÉVATION VERTICALE DES POIDS.					
Un homme montant une rampe douce ou un escalier sans fardeau, son travail consistant dans l'élévation du poids de son corps	65	0,15	9,75	8	280800
Un manœuvre élevant des poids au moyen d'une corde passant sur une poulie, ce qui l'oblige à faire descendre la corde à vide	18	0,2	3,6	6	77760
Un manœuvre élevant des poids en les soulevant avec la main	20	0,17	3,4	6	73440
Un manœuvre élevant des poids en les portant sur son dos au haut d'une rampe douce ou d'un escalier	65	0,04	2,6	6	56160
3°. ACTION SUR LES MACHINES.					
Un manœuvre agissant sur une roue à chevilles ou à tambour : 1° au niveau de l'axe de la roue	60	0,15	9	8	259200
2° vers le bas de la roue	12	0,7	8,4	8	251120
Un manœuvre marchant et poussant ou tirant dans une direction horizontale	12	0,6	7,2	8	207360
Un manœuvre agissant sur une manivelle	8	0,75	6	8	172800
Un cheval attelé à un manége et allant au pas	45	0,9	40,5	8	1166400
Un cheval attelé à un manége et allant au trot	30	2	60	4,5	972400

Force vive d'un corps tournant autour d'un axe. — Moment d'inertie.

THÉORÈME. — *La puissance vive d'un corps solide tournant autour d'un axe est, à un instant quelconque, égale à la moitié du carré de la vitesse angulaire du corps à cet instant, multipliée par son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation.*

En effet, soient

ω la vitesse angulaire de ce corps à un certain instant,
m la masse d'un quelconque de ses éléments,
r la distance de cet élément matériel à l'axe de rotation.

Sa vitesse sera ωr,

Sa puissance vive sera $\frac{1}{2} m \omega^2 r^2$.

La puissance vive totale du corps est donc $\sum \frac{1}{2} m \omega^2 r^2$, et comme la quantité $\frac{1}{2} \omega^2$ entre comme facteur commun à tous les termes de cette somme qui se rapporte à un instant déterminé, cette somme se réduit à $\frac{1}{2} \omega^2 \sum m r^2$.

La quantité $\sum m r^2$, somme des produits obtenus en multipliant chaque masse élémentaire d'un système solide par le carré de sa distance à un axe, s'appelle *le moment d'inertie* du système par rapport à cet axe.

THÉORÈME. — *Le moment d'inertie d'un système solide, par rapport à un axe quelconque, s'obtient en ajoutant au moment d'inertie par rapport à un axe mené parallèlement à celui-ci par le centre de gravité, le produit de la masse entière par le carré de la distance des deux axes.*

En effet, soient Oz (*fig.* 26, *Pl. IX*) le premier axe, et AB l'autre axe. Menons Ox perpendiculaire à ces deux droites; Oy perpendiculaire au plan zOx. Soit M un point quelconque du système; appelons x et y ses coordonnées parallèles aux axes Ox et Oy. Ainsi $OP = x$, $PC = y$, sa distance MQ ou r_1 à l'axe Oz sera égale à OC ou $\sqrt{x^2 + y^2}$, et sa distance r à l'axe AB étant égale à AC, on aura, en faisant $OA = K$,

$r^2 = y^2 + (K - x)^2 = y^2 + x^2 + K^2 - 2Kx = r_1^2 + K^2 - 2Kx$;

et, en multipliant par m,

$$mr^2 = mr_1^2 + mK^2 - 2Kmx,$$

équation applicable à tout point du système en donnant à x le signe convenable, c'est-à-dire en le faisant négatif quand le point est derrière le plan yOz.

Supposons qu'on ait écrit autant d'équations semblables à la dernière qu'il y a de points, et les ajoutant, puis remarquant que puisque le centre de gravité G est sur l'axe Oz, la somme algébrique des moments $\sum mx$, par rapport au plan yOz, est nulle, on a

$$\sum mr^2 = mr_1^2 + \sum K^2 m.$$

Travail des forces appliquées à un corps solide en mouvement.

Principe. — Les points A et A′ (*fig.* 27, *Pl. IX*) étant à une distance finie l'un de l'autre, si l'on considère deux points B, B′, infiniment rapprochés l'un de A, l'autre de A′, la différence entre la distance BB′ et sa projection orthogonale PQ sur la droite AA′ est un infiniment petit d'un ordre supérieur, c'est-à-dire qu'elle est infiniment petite par rapport à la somme des distances infiniment petites AB, A′B′.

En effet, soient $AB = s$, $A'B' = s'$, $BC = z$, $CP = y$, $B'C' = z'$, $C'Q = y'$, $BB' = l$, $PQ = p$; les angles C, P, C′, Q étant droits, on a

$$l = \sqrt{p^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2};$$

d'où il résulte

$$l < p + \frac{(y' - y)^2}{2p} + \frac{(z' - z)^2}{2p},$$

car le carré de cette dernière quantité est plus grand que

$$p^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2 \quad \text{ou} \quad l^2;$$

donc

$$l - p < \frac{(y' - y)^2}{2p} + \frac{(z' - z)^2}{2p}.$$

Les coordonnées z, y, sont toutes deux plus petites que s, de même z' et y' sont plus petites que s'; donc, quels que soient les signes de ces quantités, on a

$$(y' - y)^2 < (s + s')^2 \quad \text{et} \quad (z' - z)^2 < (s + s')^2;$$

donc

$$l - p < \frac{(s + s')^2}{p};$$

donc le rapport de $l - p$ à la somme infiniment petite $s + s'$ est moindre que la fraction infiniment petite $\frac{s + s'}{p}$.

Somme de travail de deux forces égales et directement opposées, appliquées à deux points différents en mouvement.

Supposons qu'un des points mobiles parcoure la courbe ABD (*fig.* 28, *Pl. IX*), et l'autre la courbe A′B′D′. Une force F constante en intensité est appliquée au premier mobile suivant les directions successives AF, BF, ..., DF, passant par A′, B′, C′, D′, tandis qu'une force égale F′ agit sur le second mobile suivant les droites A′F′, B′F′, ..., D′F′, passant par A, B, ..., D. Les forces F, F′ produiront chacune un travail, et il s'agit d'évaluer la somme algébrique des deux travaux pris avec leurs signes.

Soient BC, B′C′ ou ds, ds', deux arcs infiniment petits décrits simultanément; α, α' leurs angles avec les forces F, F′. Ces angles sans être constants varient aussi peu qu'on veut pendant le parcours des chemins BC, B′C′. Donc, sauf une erreur qu'on rendra de plus en plus négligeable en prenant ces arcs plus petits, les travaux élémentaires correspondants seront $F\,ds \cos\alpha$, $F'\,ds' \cos\alpha'$; et leur somme $F\,(ds \cos\alpha + ds' \cos\alpha')$.

Si des points C, C′, on abaisse sur la droite BB′ les perpendiculaires CP, C′P′, on aura

$$BP = ds \cos \alpha, \quad B'P' = ds' \cos \alpha',$$

et l'expression précédente du travail élémentaire se changera en

$$F\,(BP + B'P') \quad \text{ou} \quad F\,(PP' - BB').$$

Or, d'après le principe précédent, on peut, sauf une nouvelle erreur de plus en plus négligeable, substituer à PP′ la longueur CC′, de manière que la somme des travaux élémentaires devient F (CC′ — BB′), c'est-à-dire le produit de l'une des deux forces par l'accroissement infiniment petit de la distance des deux mobiles, ce qu'on peut exprimer par $F\,dl$.

Du travail de plusieurs forces appliquées aux divers points d'un système solide.

1°. Cas où le système solide a un mouvement de translation. — La somme des travaux élémentaires des forces appliquées à un système solide, pendant le mouvement de translation de ce système, est égale au chemin élémentaire de l'un de ses points multiplié par la somme des projections des forces sur un axe parallèle à la vitesse de translation.

En effet, supposons un temps très-court pendant lequel tous les points du système décrivent des chemins égaux et parallèles, soit dx la longueur commune de ces petits chemins, et soit Ox un axe qui leur soit parallèle et de même sens. La projection orthogonale de chaque force F sur la direction du chemin de son point d'application sera égale à la projection de cette même force sur l'axe Ox; donc la somme du travail des forces sera

$$\sum dx\,F \cos(F, x) \quad \text{ou} \quad dx \sum F \cos(F, x),$$

puisque dx est un facteur commun à tous les termes de la somme. Nous aurons donc

$$d \sum \varpi F = dx \sum F_x.$$

2°. Cas où le système solide tourne autour d'un axe. — La somme des travaux élémentaires des forces appliquées à un système solide, pendant le mouvement de rotation de ce système autour d'un axe fixe, est égale au déplacement angulaire infiniment petit du système, multiplié par la somme des moments des forces par rapport à l'axe de rotation, ce que nous exprimons par la notation suivante :

$$d \sum \varpi F = d\sigma \sum M_A F,$$

en désignant par $M_A F$ le moment d'une des forces F par rapport à l'axe A.

En effet, soit M (*fig.* 29, *Pl. IX*) le point d'application d'une force F, point qui fait partie d'un système solide tournant autour d'un axe fixe. Par ce point faisons passer perpendiculairement à l'axe fixe un plan que nous prendrons pour celui de la figure; soit A la projection de l'axe sur ce plan. Considérons un temps très-court pendant lequel tous les points du système décrivent des arcs d'un même nombre de

degrés, et soit $d\sigma$ le déplacement angulaire du système pendant ce temps, c'est-à-dire l'arc décrit par un point qui, lié invariablement au système serait à une unité de distance de l'axe. Si l'on désigne par ds l'arc décrit pendant le même temps par le point M, et si l'on appelle r sa distance à l'axe A, on a

$$ds = rd\sigma.$$

On obtiendra le travail de la force F pendant que son point d'application M décrit le chemin ds, en multipliant cet arc par la projection de la force sur la tangente MT, menée à ce même arc dans le sens du mouvement; en effet, soit P la projection de la forçe F sur le plan de l'arc décrit, qui est le plan de la figure, et soit α l'angle que cette projection fait avec la tangente. Il est aisé de voir que la projection de la force F sur la tangente MT est aussi la projection de P sur cette tangente, de sorte qu'elle est représentée par Ml et exprimée par $P\cos\alpha$. Ainsi, le travail élémentaire de F est $ds\,P\cos\alpha$ ou $d\sigma\,Pr\cos\alpha$.

Or, d'après la figure, la quantité $r\cos\alpha$ est égale à OK, plus courte distance de la force F à l'axe O prise avec le signe + ou — selon que l'angle α est aigu ou obtus; donc, si l'on représente cette distance OK par p, le travail élémentaire de F se trouve égal à $\pm\, d\sigma Pp$.

Si, au lieu d'une force, il y en a plusieurs appliquées au même système solide, leurs travaux élémentaires respectifs dans le même temps, auront tous de pareilles expressions dans lesquelles le facteur ds sera commun.

Remarque. — On appelle le *moment* de la force F par rapport à son axe, le produit $\pm Pp$ que l'on obtient en multipliant la projection P d'une force F sur un plan perpendiculaire à un axe par la distance p de la force à l'axe, et en affectant le résultat du signe qui convient au travail de la force dans le mouvement de rotation de son point d'application autour de l'axe.

Du travail dû à la pesanteur dans le mouvement d'un système matériel quelconque.

Si parmi les causes quelconques du mouvement d'un point matériel, on considère séparément son poids, le travail de cette force entre deux positions quelconques M_0, M (*fig.* 30, *Pl. IX*) de son point d'application est égal au produit de l'intensité constante de cette même force par la hauteur MN, dont le point, dans sa seconde position, se trouve au-dessous du plan horizontal passant par la première position, quelle que soit d'ailleurs la courbe M_0M. Si le point M est plus élevé que M_0, le travail dont il s'agit est négatif. Ainsi, en désignant par p le poids du point matériel considéré, par h la hauteur dont ce point s'est définitivement abaissé, quantité négative quand le point s'est élevé, le travail dû à la pesanteur dans ce déplacement est ph.

Autrement, si l'on représente par z_0 et z les ordonnées du point dans ses deux positions initiale et finale, par rapport à un plan horizontal, le sens positif de ces ordonnées étant pris de haut en bas, le travail du poids p est $p\,(z - z_0)$.

Cherchons l'expression du travail dû à la pesanteur dans un système matériel quelconque en mouvement, et représentons les poids des

divers points du système par $p', p'', p''' \ldots$: si les ordonnées initiales et finales, prises verticalement de haut en bas, par rapport à un plan horizontal, sont $z'_0, z''_0, z'''_0, \ldots, z', z'', z''', \ldots$ le travail total dû à la pesanteur, pendant que le système passe de la première position à la dernière, sera

$$p'(z' - z'_0) + p''(z'' - z''_0) + p'''(z''' - z'''_0) + \ldots$$

ou bien

$$p'z' + p''z'' + p'''z''' \ldots \quad - (p'z'_0 + p''z''_0 + p'''z'''_0 +) \ldots$$

ce que nous exprimons en abrégé par l'équation

$$\sum \varpi p = \sum pz - \sum pz_0.$$

En désignant par Z_0 et Z les ordonnées initiale et finale du centre de gravité, et par P le poids total du système, cette formule se transforme en celle-ci :

$$\sum \varpi p = PZ - PZ_0 \quad \text{ou} \quad \sum \varpi p = P(Z - Z_0).$$

Donc, dans un système quelconque en mouvement, le travail dû à la pesanteur est égal au poids total du système multiplié par la hauteur dont le centre de gravité s'est abaissé. Il est bien entendu que si ce point s'est élevé, la hauteur est négative ainsi que le travail.

Mouvement varié rectiligne produit par une force constante.

Le mouvement d'un point matériel qui possède, à l'instant pris pour instant initial, une vitesse due à des causes antérieures, reçoit, à partir de cet instant, l'action d'une force constante dirigée suivant la même droite que la vitesse initiale et dans le même sens ou en sens contraire.

La théorie de ce mouvement présente deux questions à résoudre :

1°. *Déterminer l'espèce de mouvement qui résulte de ce que la force est constante, quelle que soit d'ailleurs son intensité ;*

2°. *Déterminer l'influence de cette intensité en comparant les mouvements de deux points matériels égaux soumis à deux forces constantes différentes.*

Première question. — La solution de la première question repose sur le principe suivant :

Lorsqu'un système quelconque de points matériels possède un mouvement de translation rectiligne et uniforme, si un autre point, ayant à un certain instant la vitesse d'entraînement du système, reçoit à partir de cet instant l'action d'une ou de plusieurs forces, il prend, relativement au système, le même mouvement que ces forces lui imprimeraient si le mouvement commun n'existait pas. C'est ainsi que, sur un bateau transporté d'un mouvement rectiligne uniforme, les mouvements relatifs que nous exécutons ou que nous imprimons aux corps emportés avec nous, sont les mêmes qu'ils seraient si le bateau était en repos.

De cette loi résulte la proposition suivante :

Si un point matériel possédant une vitesse initiale quelconque est sollicité par une force constante et unique, dirigée suivant la même

droite que cette vitesse, son mouvement est uniformément varié, et son accélération, indépendante de la vitesse initiale, est de même sens que la force.

En effet, quelle que soit la vitesse v à un instant quelconque, si l'on suppose le mobile entouré d'une enveloppe éloignée, dont tous les points aient cette même vitesse v et la conservent uniformément, le point sollicité par la force pendant un temps déterminé recevra dans cette enveloppe une vitesse relative indépendante de la vitesse d'entraînement v, et parallèle à cette vitesse; or dans ce cas la vitesse relative n'est autre chose que la variation de la vitesse absolue pendant le temps considéré : il s'ensuit que dans des temps égaux quelconques les variations positives ou négatives de la vitesse sont égales et indépendantes de la vitesse initiale; si la force agit dans un sens négatif, la variation de la vitesse est négative. Il en résulte que la même force qui, agissant dans le sens positif, imprime à un mobile une accélération positive, produirait sur le même mobile une accélération négative numériquement égale, si elle agissait en sens contraire.

Si l'on désigne par x_0 la distance du point matériel, pour l'instant initial à compter d'un point fixe de la droite qu'il parcourt;

Par v_0, sa vitesse à ce même point; par x et v, les quantités analogues à la fin du temps t; par j, l'accélération constante du mouvement;

Le théorème précédent est exprimé algébriquement par l'une ou l'autre des trois équations ci-après, dont les deux dernières sont les conséquences de la première :

$$\frac{dv}{dt}=j; \quad v=v_0+jt; \quad x=x_0+v_0t+\frac{1}{2}jt^2.$$

Deuxième question. — Cette solution repose sur le principe suivant :

Lorsqu'un système quelconque de points matériels possède un mouvement de translation rectiligne varié, si un autre point, ayant à un certain instant la vitesse d'entraînement du système, reçoit à partir de cet instant, en outre de la force nécessaire pour le faire participer à l'accélération du système, l'action d'une ou de plusieurs forces, il prend, relativement au système, le même mouvement que ces dernières forces lui imprimeraient si les vitesses et les forces qui se rapportent au mouvement commun n'existaient pas.

Cette loi conduit à la proposition suivante :

Deux points matériels égaux, sollicités par des forces inégales agissant dans la direction de leurs vitesses initiales, reçoivent des accélérations proportionnelles à ces forces.

Soit 2F l'une des forces, double de l'autre désignée par F. Si l'on appliquait aux deux points égaux, d'abord en repos, deux forces égales F supposées parallèles, les deux points marcheraient d'un mouvement commun, et uniformément accéléré. Mais l'un des corps recevant en outre, dès l'instant du départ, une seconde force F, prend par rapport à l'autre corps, au bout d'un temps quelconque, une vitesse relative égale à la vitesse absolue que la force unique F imprime dans le même temps au second corps. Donc, le premier

possède, à un instant quelconque, une vitesse double, et par conséquent il a constamment une accélération double à celle du second.

On démontrerait de même la proposition pour le cas où l'une des forces serait 2, 3, 4,... n fois l'autre.

Enfin, si les forces sont dans le rapport de deux nombres entiers n, n' ou représentées par nF_1 et $n'F_1$, en désignant par j_1 l'accélération due à l'action de F_1 sur l'un des points égaux considérés, on voit que les accélérations produites par nF_1 et $n'F_1$ sont nj_1 et $n'j_1$: elles sont par conséquent proportionnelles aux forces.

Relation entre la masse d'un point matériel, la force qui le sollicite et l'accélération que cette force lui imprime.

Soient deux points matériels A et A_1 que nous supposerons inégaux, c'est-à-dire tels, que sous l'action de forces égales ils prennent des accélérations inégales. Soient F, F_1, deux forces appliquées respectivement à ces deux corps, et j, j_1 les deux accélérations qui en résultent.

Les deux quotients $\frac{F}{j}$, $\frac{F_1}{j_1}$, différents entre eux, en général, parce qu'ils s'appliquent à deux corps distincts A, A_1, restent constants pour chaque corps, quelle que soit la force qu'on adopte pour dividende, pourvu qu'on prenne en même temps ponr diviseur l'accélération correspondante à cette force supposée appliquée au corps considéré.

Supposons maintenant qu'on imprime aux deux corps A, A_1 une même accélération S, et soient φ, φ_1 les forces respectives nécessaires à cet effet, nous aurons

$$\frac{\varphi}{j} = \frac{F}{S}, \quad \frac{\varphi_1}{j_1} = \frac{F_1}{S}, \quad \text{d'où} \quad \varphi : \varphi_1 :: \frac{F}{j} : \frac{F_1}{j_1}.$$

Ainsi, les quotients $\frac{F}{j}$, $\frac{F_1}{j_1}$, ci-dessus définis, sont entre eux dans le même rapport que deux forces φ, φ_1 qui, agissant sur les corps A, A_1, leur imprimeraient une même accélération d'ailleurs quelconque.

On sait que les masses de deux points matériels sont proportionnelles aux forces capables de leur imprimer un même mouvement. Donc les masses des corps A, A_1, que nous désignons par m, m_1, sont proportionnelles à φ, φ_1. On peut donc, dans la proportion précédente, substituer m et m_1 à φ et φ_1.

Ainsi,

$$m : m_1 :: \frac{F}{j} : \frac{F_1}{j_1},$$

c'est-à-dire que les masses des deux corps A, A_1 sont entre elles comme les quotients qu'on obtient en divisant deux forces quelconques F, F_1 supposées appliquées respectivement à ces deux corps, par les accélérations j, j_1 qu'elles leur feraient prendre.

Cette proportion est indépendante du choix des unités de force d'accélération et de masse. Elle se simplifie à l'aide d'une convention

généralement adoptée en mécanique : on prend pour unité de masse celle d'un corps qui, sous l'action d'une unité de force, prendrait l'unité d'accélération.

D'après cela, si, dans la dernière proportion, on fait F_1 et j_1 égales à leurs unités respectives, il faut faire en même temps m_1 égale à l'unité de masse, et l'on a ainsi

$$m : \text{unité de masse} :: \frac{F}{j} : \frac{\text{unité de force}}{\text{unité d'accélération}}, \quad \text{ou enfin} \quad m = \frac{F}{j},$$

équation non homogène, dont le véritable sens est exprimé par la proportion précédente.

Relation entre la quantité de mouvement, la force et le temps.

Dans le mouvement rectiligne, les quantités de mouvement acquises par deux points matériels, pendant un même temps, sous l'action de forces constantes pour chaque corps, sont proportionnelles à ces forces.

Soient, en effet, m et m' les deux masses, $v - v_0$ et $v' - v'_0$ les vitesses acquises pendant le temps t, par l'effet des forces constantes F et F', on aura

$$mv - mv_0 = Ft \quad \text{et} \quad m'v' - m'v'_0 = F't,$$

d'où

$$\frac{mv - mv_0}{m'v' - m'v'_0} = \frac{F}{F'}.$$

Si l'on suppose que les deux corps soient partis du repos, au commencement du temps t, la proportion se réduit à

$$\frac{mv}{m'v'} = \frac{F}{F'}.$$

Ainsi *les quantités de mouvement de deux points matériels différents, sont proportionnelles aux forces constantes qui ont pu les produire dans un même temps.*

Relation entre le travail et la force vive.

D'après la définition générale du travail d'une force, les divers cas qu'on peut considérer sont renfermés dans un énoncé commun que nous appellerons théorème de la relation entre le travail et la puissance vive, ou, plus simplement, théorème de l'effet du travail dans le mouvement rectiligne d'un point matériel.

La variation de la puissance vive est numériquement et algébriquement égale au travail des forces dans le même temps.

En considérant les deux cas particuliers où l'une des vitesses v_0, v est nulle, on voit que la puissance vive possédée par un point matériel est 1° égale au travail total qu'il a reçu depuis qu'il est sorti du repos; 2° numériquement égale au travail négatif nécessaire pour réduire ce point au repos. C'est cette dernière propriété qui nous fait donner à la quantité $\frac{1}{2}mv^2$ la dénomination de *puissance vive*, équivalente à celle de *capacité*, que possède un point matériel en mouve-

ment, de subir, jusqu'à ce qu'il soit réduit au repos, un certain travail résistant, en vertu de sa masse et de sa vitesse.

Application à la chute des corps pesants.

Une tige prismatique verticale est fixée à son extrémité supérieure ; on attache à l'autre extrémité un corps M dont le poids est Q. Ce corps, d'abord soutenu de manière qu'il n'exerce aucune action sur la tige, est subitement abandonné à la pesanteur : dès lors la tige s'allonge d'une quantité variable x, et en même temps exerce sur le corps une force variable. On admet que cette force, qu'on peut appeler la tension de la tige, est proportionnelle :

1°. Au rapport de l'allongement x à la longueur L primitive ou naturelle de la tige;

2°. A la section A de la tige, section rapportée au mètre carré; ainsi l'on a

$$F = \frac{EAx}{L},$$

E, qu'on appelle coefficient ou module de l'élasticité, étant un nombre de kilogrammes dépendant de la matière de la tige. S'il s'agit du fer forgé, on a à peu près $E = 2 \times 10^k$: d'où l'on conclura, par exemple, qu'un fil de fer de 1 millimètre carré de section et de 1 mètre de longueur primitive, est allongé d'un demi-millimètre quand sa tension est de 10 kilogrammes, c'est-à-dire quand il exerce sur chacun de ses points d'attache extrêmes une force de 10 kilogrammes.

Le coefficient $\frac{EA}{L}$ de x, dans l'équation précédente, est la mesure de la raideur de ressort de la tige dans le sens longitudinal.

La loi exprimée par cette équation n'est admissible que jusqu'à un certain état d'extension qu'on appelle *la limite de l'élasticité*, et qui, pour le fer, correspond à une tension de 12 à 18 kilogrammes par millimètre carré de section, suivant la qualité du fer. Cette loi suppose enfin que la tige est uniformément allongée dans toute son étendue, ce qui n'a lieu, à la rigueur, pendant le mouvement, que dans le cas où l'allongement s'opère lentement. L'expression ci-dessus de F peut encore être considérée comme suffisamment exacte, même pendant le mouvement rapide, lorsque la masse de la tige est petite par rapport à celle du corps M.

Ces hypothèses étant admises, on demande quel sera le mouvement du corps M considéré comme un point matériel.

Soit M un corps dont la masse est $\frac{Q}{g}$, soit x la longueur qu'il a parcourue depuis le commencement du mouvement; sa vitesse étant v, sa puissance vive est $\frac{1}{2}\frac{Q}{g}v^2$: donc on aura

$$\frac{1}{2}\frac{Q}{g}v^2 = Qx - \frac{1}{2}\frac{EA}{L}x^2.$$

Soit l l'allongement correspondant à l'instant où la tension T est égale à Q. M. Poncelet appelle *allongement de stabilité* la quantité $\frac{l}{L}$

qui est l'allongement, par mètre de longueur primitive, de la tige portant le poids Q en repos; on aura, en faisant $F = Q$ et $x = l$,

$$Q = \frac{EA}{L} l, \quad \text{d'où} \quad \frac{EA}{L} = \frac{Q}{l},$$

et enfin

$$v^2 = \frac{g}{l}(2l - x)x.$$

La vitesse v est donc proportionnelle à l'ordonnée y d'un cercle dont $2l$ serait le diamètre et x l'un de ses segments.

Le maximum de v a lieu pour $x = l$, ce qui doit être, puisque la force F opposée à Q lui est égale dans cette position, et ensuite devenant plus grande, oblige le mouvement de se ralentir. Ce maximum de vitesse est $V = \sqrt{gl}$, vitesse due à la moitié de l.

Le corps M cesse de descendre et la tige de s'allonger, quand v redevient nulle, ce qui a lieu pour $x = 2l$; alors F devient $2Q$, de sorte que dans cette position extrême l'allongement et la tension sont doubles de ce qu'ils seraient, si la tige supportait le corps M en repos.

Mouvement et décomposition des forces concourantes; parallélogramme et polygone des forces.

Nous considérerons d'abord un point partant du repos sous l'action de deux forces F', F'' constantes en intensité et en direction, c'est-à-dire qu'elles se transportent parallèlement à elles-mêmes avec le point matériel auquel elles s'appliquent.

Soit A (*fig.* 31, *Pl. IX*) la position initiale du mobile; soit $AB = X$ le chemin que la force F', si elle était seule, ferait parcourir au mobile dans le temps t; on aura

$$X = \frac{1}{2} \frac{F'}{m} t^2.$$

Soit de même $AC = Y$ le chemin que la force F'', si elle agissait seule, ferait parcourir au même mobile dans le même temps; nous aurons de même

$$Y = \frac{1}{2} \frac{F''}{m} t^2.$$

Cela posé, si l'on imagine une enveloppe mobile dont tous les points aient le même mouvement accéléré que prendrait le point matériel considéré en vertu de la seule force F', ce corps prendra, par rapport à cette enveloppe, un mouvement relatif dû à la force F'', exactement comme si, ni le mouvement de l'enveloppe, ni la force F' n'existaient. Donc, dans le même temps t que la droite AC, considérée comme une suite de points géométriques liés à l'enveloppe, emploiera à se transporter en BM, égale et parallèle à AC, le point matériel dont il s'agit, se transportera d'une extrémité à l'autre de cette droite, et se trouvera finalement en M.

D'où l'on peut conclure :

1°. Que le mobile ne sort pas du plan déterminé par les directions des deux forces;

2°. Qu'il parcourt la diagonale du parallélogramme ayant pour côtés

des lignes dirigées suivant les forces et proportionnelles à leurs intensités, car l'élimination de t, entre les deux expressions de X et de Y, donne $\frac{X}{Y} = \frac{F''}{F'}$;

3°. Que les espaces qu'il parcourt, comptés depuis le point de départ A, sont, comme X et Y, proportionnels aux carrés des temps t;

4°. Qu'il se meut comme s'il était sollicité par une force unique R, dirigée suivant cette diagonale et satisfaisant à l'équation

$$AM = \frac{R}{m} \times \frac{t^2}{2},$$

laquelle, combinée avec

$$AB = \frac{F'}{m} \times \frac{t^2}{2} \quad \text{et} \quad AC = \frac{F''}{m} \times \frac{t^2}{2},$$

donne la double proportion

$$R : F' : F'' :: AM : AB : AC.$$

Si l'on prend sur les directions des forces F', F'', à partir du point A, deux longueurs Ab, Ac proportionnelles à ces forces, elles seront aussi proportionnelles à AB et AC, et si l'on achève le parallélogramme Abmc semblable à ABMC, les diagonales coïncideront et l'on aura

$$Am : Ab : Ac :: AM : AB : AC,$$

et, par suite,

$$R : F' : F'' :: Am : Ab : Ac.$$

Donc la force R, qui seule imprimerait, à un point matériel libre partant du repos, le mouvement qu'il prend en vertu de deux forces F', F'', est représentée, pour l'intensité et la direction, par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux lignes qui représentent de même les deux forces.

La force R est la résultante des forces F' et F'' qui sont ses composantes, et la proposition qui vient d'être démontrée est connue sous le nom de *théorème du parallélogramme des forces*.

On raisonnera pour trois forces comme on vient de le faire pour deux, en représentant la résultante de deux par la notation Res (F', F''). Le mouvement absolu du mobile résultera du mouvement commun dû à F''' et du mouvement relatif dû à Res (F', F''); il est donc le même que s'il était produit par une force unique formée de Res (F', F'') et de F''', suivant le même théorème.

On raisonnera de même pour quatre forces, et ainsi de suite, et l'on arrive à la règle suivante pour la résultante d'un nombre quelconque de forces appliquées à un point partant du repos.

Théorème du polygone des forces. — *La résultante* R *d'un nombre quelconque de forces* F', F'',..., F^n *appliquées à un même point, est représentée, pour la grandeur et la direction, par la droite formant un polygone qui, partant du point d'application, a ses côtés égaux et parallèles en même sens aux droites qui représentent les composantes.*

Mouvement curviligne d'un point sous l'influence de forces quelconques.

Si le mobile possède une vitesse précédemment acquise, dont la

direction ne soit pas sur la même droite que celle de la résultante, le mouvement qui a lieu est curviligne, et sa détermination repose sur ce principe : que dans le mouvement rectiligne, sous l'action de forces dirigées suivant la même droite que la vitesse, l'accélération est indépendante de la vitesse acquise, et reste constante si la somme algébrique de ces forces ne varie pas. Nous considérerons d'abord le cas où les forces sont constantes d'intensité et de direction, c'est-à-dire qu'elles se transportent parallèlement à elles-mêmes avec le point matériel auquel elles s'appliquent ; telle est, par exemple, l'action de la pesanteur sur un corps lancé avec une vitesse oblique à l'horizon.

Soient (*fig.* 32, *Pl. IX*) :

R la résultante des forces actuellement agissantes ;

A la position initiale du mobile ;

AX la direction de la vitesse initiale v_0 produite par l'action antérieure de forces quelconques ;

AY la direction de la résultante actuelle R ;

AB = X le chemin que parcourrait le mobile dans le temps t, si la vitesse v_0 existait seule sans la force R, de sorte qu'on a $X = v_0 t$;

AC = Y le chemin qu'il parcourrait dans le même temps t, en vertu de la force R, si la vitesse initiale v_0 n'existait pas, d'où résulte

$$Y = \frac{1}{2}\frac{R}{m}t^2.$$

Si l'on imagine une enveloppe mobile douée de la vitesse v_0, la droite AC considérée comme une suite de points géométriques liés à cette enveloppe, se trouvera, au bout du temps t, transportée en BM égale et parallèle à AC. Or, pendant ce temps, le point matériel dont il s'agit devra, en vertu de son mouvement relatif, passer successivement par ces mêmes points géométriques ; donc il se trouvera finalement en M. On en conclut :

1°. Que le point M ne sort pas du plan déterminé par les directions initiales de la vitesse et de la force ;

2°. Que ses coordonnées par rapport à ses directions AX, AY, étant désignées par X et Y après un temps t quelconque sont exprimées par les équations

$$X = v_0 t, \quad Y = \frac{1}{2}\frac{R}{m}t^2;$$

d'où, en éliminant t, on trouve

$$Y = \frac{R}{2mv_0^2}X^2$$

pour l'équation de la courbe parcourue par le mobile rapportée aux axes AX, AY. C'est une parabole tangente à la direction AX de la vitesse initiale, et ayant son axe principal parallèle à la direction AY de la force constante R. Il est facile de la construire par points.

Il ne faut pas croire que le mobile décrit la diagonale du parallélogramme ABMC, comme si la vitesse v_0 était une force constante, agissant en même temps que celles dont la résultante est R. On ne doit pas non plus dire que le mouvement du point matériel de A en M est dû à une résultante de la force actuelle R, et de la force antérieure

qui a produit la vitesse v_0; car on ne peut combiner ou composer plusieurs forces pour en conclure une résultante, que dans le cas où ces forces agissent simultanément.

Les axes AX, AY représentent, l'une la direction de la vitesse initiale, l'autre la direction de la résultante. Mais il est souvent utile de considérer le mouvement d'un point rapporté à des axes coordonnés quelconques. Imaginons donc un axe Ox situé dans l'espace, et supposons que pendant que le point parcourt la courbe AM, on projette sur cet axe Ox les positions successives du mobile par des droites parallèles à un plan quelconque yOz. Cela posé, cherchons la loi du mouvement de la projection mobile qui est en P_0 à l'instant initial, et en P à fin du temps t.

Appelons x l'abscisse variable OP; x_0 sa valeur initiale OP_0; v_{0x} la projection de la vitesse initiale v_0 sur l'axe des x; R'_x la projection de la force R sur ce même axe.

En remarquant : 1°. Que P_0P est la somme algébrique des projections de AB et de BM ou AC;

2°. Que AB étant $v_0 t$, sa projection peut s'obtenir, en multipliant la projection de v_0 ou v_{0x} par le nombre t;

3°. Que AC étant $R \times \frac{1}{2}\frac{t^2}{m}$, sa projection s'obtient en multipliant la projection de R ou R_x par $\frac{1}{2}\frac{t^2}{m}$, attendu que AC et R ayant la même direction, on peut poser la proportion

projection de AC : AC :: projection de R : R;

4°. Que R_x est égale à $\sum F_x$, on a

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{1}{2}\frac{R_x}{m}t^2 \quad \text{ou} \quad x = x_0 + v_{0x}t + \frac{1}{2}\frac{\Sigma F_x}{m}t^2,$$

équations dans lesquelles les quantités x, x_0, v_{0x}, R_x, F_x doivent être prises algébriquement, c'est-à-dire avec leurs signes.

On voit, par ce qui précède, que si un point matériel se meut dans l'espace en vertu d'une vitesse initiale v_0 et sous l'action des forces F constantes, et si on le projette à chaque instant sur un axe quelconque, sa projection s'y mouvra comme un corps qui, ayant même masse que le mobile dont il s'agit, aurait pour vitesse initiale la projection de la vitesse initiale v_0, et pour force agissante, la somme algébrique des projections des forces F ou la projection de leur résultante.

Ce théorème subsiste quand les forces sont variables soit en intensité, soit en direction : en effet, on peut concevoir le temps partagé en intervalles infiniment petits, pendant chacun desquels toutes les forces peuvent être considérées comme constantes; la courbe décrite est alors assimilée à une suite d'arcs de parabole, très-petits et tangents deux à deux, mais pouvant être dans des plans différents; et pendant que chaque petit arc est parcouru, la projection du mobile sur un axe se meut suivant la loi qui vient d'être exposée.

Mouvement d'un point considéré indépendamment de la courbure de la ligne qu'il décrit. — Effet du travail des forces quelconques. — Effet de la force tangentielle.

Premier principe. — On démontre que l'accroissement de la puissance vive du point matériel pendant un certain temps est égal au travail total de la résultante des forces qui le sollicitent pendant le même temps.

Mais cette proposition est établie sur l'hypothèse que la direction de la force R est constante. Dans le cas où cette direction serait variable, on pourrait la considérer comme constante pendant des petits temps $\theta_1, \theta_2 \ldots$, pour chacun desquels on aurait une équation pareille à la dernière du numéro précédent. Ainsi, en désignant les travaux successifs de R par $\mathfrak{T}_1 R$, $\mathfrak{T}_2 R$, on a

$$\text{Pour le temps } \theta_1 \ldots\ldots\ldots \quad \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \mathfrak{T}_1 R,$$

$$\text{Pour le temps } \theta_2 \ldots\ldots\ldots \quad \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \mathfrak{T}_2 R,$$

$$\text{Pour le dernier temps } \theta_n \ldots \quad \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_{n-1} = \mathfrak{T}_n R;$$

d'où, en ajoutant et en remarquant que la somme des seconds membres est le travail total de la résultante variable R, on conclut

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \mathfrak{T}R,$$

équation dont l'énoncé est le même que celui du principe ci-dessus.

La proposition que nous venons de démontrer peut encore s'énoncer ainsi :

L'accroissement de la puissance vive d'un point matériel soumis à des forces quelconques, est égal à la somme algébrique des travaux de toutes ces forces entre les mêmes instants extrêmes.

C'est ce que nous appelons *le théorème de l'effet du travail total des forces* qui agissent sur un point matériel. Sa notation abrégée est

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \sum \mathfrak{T}R.$$

Deuxième principe. — Un point matériel sollicité par des forces quelconques a, sur la courbe qu'il parcourt, le même mouvement qu'il aurait sur une droite s'il était à chaque instant sollicité suivant cette droite par une force égale à la force totale tangentielle.

En d'autres termes, la vitesse et, par conséquent, l'accélération et les espaces parcourus ne dépendent que de la force totale tangentielle, tandis que la composante conjuguée normale, combinée avec la vitesse acquise, détermine la courbure de la ligne décrite.

Trajectoire d'un point pesant dans le vide.

Une des applications les plus simples des propositions précédentes, consiste dans l'étude du mouvement d'un point matériel pesant dans le vide, avec une vitesse initiale d'une direction quelconque.

1°. Si l'on prend l'axe AX (*fig.* 33, *Pl. IX*) suivant la vitesse

initiale V et l'axe AY vertical suivant la force mg, poids du corps considéré, on aura

$$X = Vt, \quad Y = g\frac{t^2}{2}, \quad Y = \frac{g}{2V^2}X^2,$$

ce qui permet de construire la parabole par points, et d'assigner la position du mobile à chaque instant.

Dans le cas où la vitesse V est horizontale, le sommet de la parabole est au point de départ A.

2°. Supposons que la vitesse initiale fasse un angle α au-dessus de l'horizon; si l'on prend deux axes rectangulaires Ox horizontal, et Oy vertical de bas en haut, on aura

$$x = V\cos\alpha \times t, \quad y = V\sin\alpha \times t - \frac{1}{2}gt^2,$$

d'où, en éliminant t, on conclut l'équation de la courbe ou trajectoire

$$y = x\,\text{tang}\,\alpha - \frac{g}{2V^2\cos^2\alpha} \times x^2.$$

Les coordonnées x, y du point culminant M_1 répondent à

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \text{ou} \quad \text{tang}\,\alpha - \frac{g}{v^2\cos^2\alpha}x_1 = 0, \quad \text{d'où} \quad x_1 = \frac{V^2}{g}\sin a\cos a,$$

et, en substituant,

$$y_1 = \frac{v^2}{2g}\sin^2\alpha.$$

On arrive au même résultat en remarquant que la projection du mobile sur l'axe Oy se meut comme un corps lancé verticalement avec la vitesse V $\sin\alpha$ et, par conséquent, s'élève jusqu'à la hauteur $y_1 = \frac{V^2\sin^2\alpha}{2g}$ due à cette vitesse dans le temps $\frac{V\sin\alpha}{g}$; puis, substituant cette dernière valeur de t dans l'équation

$$x = V\cos\alpha \times t,$$

on a comme ci-dessus,

$$x_1 = \frac{V^2\sin\alpha\cos\alpha}{2g} \quad \text{ou, plus simplement,} \quad x_1 = \frac{V^2}{2g}\sin 2\alpha.$$

La courbe décrite venant rencontrer en P_2, l'horizontale Ox menée par le point de départ O, la distance OP_2 s'appelle l'*amplitude horizontale du jet;* c'est la valeur de x qui répond à $y = 0$. La seconde équation donne alors

$$t = \frac{2V\sin\alpha}{g},$$

temps double de la durée de l'ascension de O en M; et en substituant dans $x = V\cos\alpha \times t$, on a

$$OP_2 = x_2 = \frac{2V^2\sin\alpha\cos\alpha}{g} \quad \text{ou, plus simplement,} \quad x_2 = \frac{V^2}{g}\sin 2\alpha.$$

Le maximum de l'amplitude horizontale, quand on fait varier α, en conservant la même vitesse initiale V, répond à celui de $\sin\alpha\cos\alpha$

ou de 2 sin α, ce qui a lieu pour $2\alpha = 90°$, et l'on a alors

$$x_1 = \frac{V^2}{g};$$

c'est-à-dire que la plus grande amplitude horizontale est double de la hauteur due à la vitesse initiale, et a lieu quand cette vitesse fait un angle de 45 degrés au-dessus de l'horizon.

Force centripète dans le mouvement circulaire.

Si un point matériel décrit, d'un mouvement uniforme ou varié, une circonférence ou un arc de cercle, on en conclut, quelles que soient les circonstances de ce mouvement circulaire :

1°. Que le point dont il s'agit est continuellement sollicité par une ou plusieurs forces indépendamment de celles qui ont agi antérieurement pour produire sa vitesse actuelle, sans quoi il se mouvrait en ligne droite;

2°. Que la résultante est dans le plan du cercle.

Si à un instant quelconque on décompose cette résultante en deux forces, l'une tangentielle ψ, l'autre normale χ, la première est égale au produit de l'accélération qui a lieu à l'instant considéré, multipliée par la masse du mobile, comme si le mouvement était rectiligne; ainsi $\psi = m\frac{dv}{dt}$; et la force normale χ agit dans ce sens allant de la circonférence au centre, ce qui lui a fait donner le nom de *force centripète*.

PROBLÈME. — *Déterminer l'intensité χ de la force centripète en fonction de la masse* m *du mobile, de sa vitesse* v *et du rayon* r *de l'arc de cercle décrit.*

Supposons qu'à l'instant considéré le point matériel soit en M (*fig.* 34, *Pl. IX*); qu'après un petit temps θ, il soit en M', et appliquons à la projection mobile de ce point sur le rayon MO le principe démontré précédemment. Cette projection décrira pendant le temps θ l'espace MP avec un mouvement dont la vitesse initiale sera nulle, puisque, à l'instant du passage du mobile au point M, la vitesse v est perpendiculaire à l'axe MO. A ce même instant initial, la projection de la force χ sur MO est cette force elle-même, tandis que la projection de ψ est nulle.

Pendant le parcours, depuis M jusqu'au point très-voisin M', l'intensité de la force normale variera très-peu, et sa projection sur MO différera aussi peu qu'on voudra de χ, pourvu qu'on prenne l'arc MM' assez petit. En même temps, la projection de la force tangentielle ψ sur MO différera aussi peu qu'on voudra de zéro. Donc, sauf une erreur relative qu'on rendra aussi petite qu'on voudra en faisant décroître MM', on peut supposer MP égal à l'espace qui serait décrit par un mobile ayant la masse m, et constamment sollicité par la force χ. Par conséquent, en désignant le segment MP par x, on peut poser l'équation

$$x = \frac{1}{2}\frac{\chi}{m}\theta^2.$$

On commet ainsi une très-petite erreur relative; la quantité qui

manque au second membre est non-seulement très-petite par rapport à l'unité de longueur, mais une fraction très-petite de la valeur écrite $\frac{1}{2}\frac{\chi}{m}\theta^2$ ou de x. De là résulte la conséquence que l'équation, à la rigueur inexacte ou incomplète tant que x et θ représentent des quantités finies ou réellement existantes, devient rigoureusement exacte si l'on comprend que le rapport $\frac{x}{\theta^2}$ des quantités très-petites qui figurent dans les deux membres doit être remplacé par la limite dont il s'approche indéfiniment, c'est-à-dire autant qu'on veut à mesure que x et θ^2 décroissent simultanément. C'est ce qu'on exprime d'une manière abrégée en disant que l'équation devient tout à fait exacte lorsque x et θ sont infiniment petits.

Soit s le petit arc MM'; $\frac{s}{\theta}$ est la vitesse moyenne dans l'étendue de cet arc, et à mesure que celui-ci diminue, on a, avec une erreur qui disparaît à la limite,

$$\frac{s}{\theta} = v, \quad \text{d'où} \quad \theta^2 = \frac{s^2}{v^2}.$$

Enfin, à mesure que l'arc s diminue et approche de se confondre avec sa corde, on a, aussi exactement qu'on veut, la relation

$$s^2 = 2rx.$$

En éliminant x, θ et s, on obtient

$$s = \frac{\chi r}{mv^2}, \quad \text{d'où} \quad \chi = \frac{mv^2}{r},$$

résultat dégagé de toute quantité décroissante, et par conséquent rigoureusement exact, puisque s'il contenait une erreur, on serait libre de l'atténuer en faisant décroître les variables θ, x, s, qui n'y entrent pas, sans changer les constantes χ, m, v^2, r; ce qui serait absurde.

La dernière formule est donc l'expression cherchée de la force centripète.

Exemple du mouvement circulaire. — Concevons qu'un fil inextensible et dont la masse puisse être négligée ait une de ses extrémités fixée, et que l'autre soit attachée à un point matériel. Si celui-ci est mis en mouvement et ensuite abandonné à la seule force qu'exercera sur lui le fil tendu, la pesanteur étant supposée ne pas exister, le mouvement du corps dont il s'agit sera circulaire et uniforme, $\frac{mv^2}{r}$ sera l'intensité de la force exercée par le fil sur le mobile.

Nous trouvons ici l'occasion d'appliquer le principe que : *toute action est accompagnée d'une réaction égale et contraire*. En vertu de ce principe, le corps que nous venons de considérer, recevant du fil qui le retient sur la circonférence une force $\frac{mv^2}{r}$, exerce réciproquement sur le fil, et par conséquent sur le point central fixe, une force

de même intensité $\frac{mv^2}{r}$, mais dirigée dans le sens allant du centre à la circonférence.

Cette force égale et contraire à la force centripète s'appelle *force centrifuge*. Elle n'agit point sur le corps décrivant la circonférence dont le rayon est r; elle est au contraire exercée par lui sur le corps qui le retient sur cette circonférence.

On ferait les remarques analogues sur un point matériel décrivant un cercle en vertu d'une vitesse acquise et sans autre force actuelle que celle qu'il obtiendrait en s'appuyant sur la concavité d'une courbe sans frottement. Dans ce cas, c'est la courbe qui exerce sur le corps la force centripète nécessaire à son mouvement circulaire, et réciproquement le corps exerce sur la courbe la force centrifuge.

OSCILLATIONS DU PENDULE SIMPLE.

La résistance de l'air et le frottement du fil ou de la tige de suspension diminuent assez rapidement l'amplitude des oscillations si elle est grande; mais leur influence devient insensible quand l'amplitude est devenue très-petite, et l'on peut alors calculer la durée des oscillations en faisant abstraction de la matière du fil ou de la tige de suspension. Cette conception théorique constitue le *pendule simple*; le rayon de l'arc décrit par le point pesant est la *longueur* du pendule.

Durée des petites oscillations du pendule (*fig.* 35, *Pl. IX*). — Lorsque le corps parti de A est arrivé en M, sa vitesse v est donnée par la formule

$$v = \sqrt{2gx},$$

déduite de l'équation de l'effet du travail, en appelant x la projection BP de l'arc AM sur la verticale OC. Prenons à partir de M un arc infiniment petit MM′ ou ds, parcouru dans le temps infiniment petit dt, nous aurons

$$v = \frac{ds}{dt} \quad \text{et par conséquent} \quad dt = \frac{ds}{\sqrt{2gx}}.$$

Telle est l'expression du temps employé à parcourir l'arc infiniment petit ds, en fonction de la longueur de cet arc et de l'abscisse x ou BP.

Pour avoir la durée d'une demi-oscillation, c'est-à-dire du parcours de l'arc AC, il faut intégrer cette expression de dt, et d'abord remplacer ds par sa valeur en x et dx. Menons l'ordonnée M′P′; PP′ est l'accroissement de x pendant le temps dt, ainsi PP′ $= dx$. La relation cherchée entre ds et dx se reconnaît aisément dans la figure en menant le rayon MO, et la petite verticale M′N égale à dx. Le triangle infiniment petit MM′N rectangle et semblable à OMP donne, en appelant y l'ordonnée MP et l le rayon MO,

$$\text{MM}' : \text{M}'\text{N} :: \text{MO} : \text{MP} \quad \text{ou} \quad ds : dx :: l : y,$$

d'où

$$ds = \frac{l\,dx}{y}.$$

Puis substituant la valeur de ds dans l'équation précédente, on a

$$dt = \frac{l}{\sqrt{2g}} \times \frac{dx}{y\sqrt{x}},$$

formule dans laquelle il serait facile de remplacer y par sa valeur exacte en x et en quantités connues. Mais la fonction qu'on obtient ainsi n'étant pas de celles qu'on sait intégrer sous forme finie, on commence par la simplifier, en remarquant que lorsque l'arc AC est suffisamment petit, le rapport de l'ordonnée MP ou y à la corde MC diffère très-peu de l'unité, de sorte que si l'on écrit

$$y = \frac{\text{corde CM}}{\alpha},$$

α est un nombre variable, mais très-peu supérieur à 1.

La corde CM étant moyenne proportionnelle entre le diamètre $2l$ et le segment variable CP, que nous désignerons par z, nous aurons

$$\text{CM} = \sqrt{2lz}, \quad \text{d'où} \quad y = \frac{1}{\alpha}\sqrt{2lz},$$

et, par suite, en substituant cette valeur dans l'expression précédente de dt,

$$dt = \frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \times \frac{dx}{\sqrt{xz}}.$$

La somme des variables x et z est constante et égale à BC; désignons-la par $2b$ et, par conséquent, z par $2b - x$, nous aurons

$$dt = \frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}\,\frac{dx}{\sqrt{2bx - x^2}}.$$

Si, au lieu d'avoir égard à la variabilité de α, on remplace cette quantité par l'unité, ou au moins par une constante moyenne entre les diverses valeurs qu'elle peut prendre, l'expression de dt devient alors facile à intégrer. En effet $\sqrt{xz}$ est égale à l'ordonnée PL d'une demi-circonférence construite sur BC comme diamètre; si l'on désigne par $d\sigma$ l'arc LL′ qu'interceptent sur cette demi-circonférence les horizontales MP, M′P′, en menant la petite verticale LH égale à dx, et le rayon LI égal à b, on a deux triangles semblables LHL′, LPI, qui donnnent

$$\text{PL} : \text{IL} :: \text{LH} : \text{LL}' \quad \text{ou} \quad \sqrt{xz} : b :: dx : d\sigma;$$

tirant de là la valeur de $\sqrt{xz}$, et la substituant dans l'expression de dt, on a

$$dt = \frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \times \frac{d\sigma}{b}.$$

Tel est le temps employé à parcourir le petit arc MM′ ou ds compris entre les mêmes horizontales que $d\sigma$ ou LL′.

Si l'on considère α comme égal à 1, dont il diffère très-peu quand l'angle AOB est petit, on aura le temps total de la demi-oscillation, en multipliant le facteur constant $\frac{1}{2b}\sqrt{\frac{l}{g}}$ par la somme des petits arcs, tels que LL′, depuis B jusqu'à C, c'est-à-dire par la demi-circonférence BLC égale à πb, et en doublant le produit pour avoir la

durée T de l'oscillation entière, on aura

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Remarque. — La descente de A en C, suivant l'arc de cercle, se fait dans le temps $\frac{1}{2}\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, tandis que, suivant la corde, elle exigerait le temps $2\sqrt{\frac{l}{g}}$. Le rapport de ces deux durées est $\frac{1}{4}\pi = 0,785$. La valeur $\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ du temps est, à la rigueur, un peu trop petite, puisqu'il faudrait multiplier chaque élément dont elle se compose par la valeur correspondante de α variable, un peu plus grande que l'unité. Pour apprécier l'erreur commise, on remarquera que la plus grande valeur de α répond à la position initiale A et est égale à $\frac{CA}{AB}$ (*fig.* 36, *Pl. IX*).

Soit β le rapport très-petit et supposé connu de la corde CA au rayon OA ou l. En abaissant sur CA l'apothème OK, on a deux triangles semblables ABC, COK (rectangles et ayant l'angle commun C) qui donnent

$$CA : AB :: l : OK.$$

Or on a

$$OK = \sqrt{l^2 - \left(\frac{1}{2}AC\right)^2} = \sqrt{l^2 - \frac{1}{4}\beta^2 l^2};$$

donc

$$\frac{CA}{AB} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{4}\beta^2}} = \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{4} + \frac{\beta^4}{16} + \ldots}$$

Vu la petitesse de B, cette quantité diffère très-peu de

$$\sqrt{1 + \frac{\beta^2}{4} + \frac{\beta^4}{64}}, \quad \text{ou de} \quad 1 + \frac{\beta^2}{8}.$$

Tel est donc approximativement le maximum de α.

Le coefficient α variant ainsi depuis $1 + \frac{\beta^2}{8}$ jusqu'à 1, on s'écartera très-peu de l'exactitude rigoureuse en substituant à cette variable une constante égale à la moyenne arithmétique de ses deux valeurs extrêmes, savoir $1 + \frac{\beta^2}{16}$. Par suite, l'intégration de la formule qui donne la valeur de dt, donne, pour la durée d'une oscillation,

$$T = \left(1 + \frac{\beta^2}{16}\right)\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Exemple.

$$AC = 0,02l, \quad \beta = 0,02; \quad \frac{\beta^2}{16} = \frac{1}{4}\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 = 0,000025.$$

Cette valeur de β répond à une amplitude d'oscillation d'environ

2°,18. On appelle ainsi l'angle parcouru par le pendule dans une oscillation; si elle était double de la valeur ci-dessus supposée, le terme de correction $\frac{B^2}{16}$ serait quadruple.

DU PENDULE CONIQUE.

Dans le pendule conique, le point matériel décrit un cercle horizontal, sous l'action de deux forces : l'une verticale mg, poids de ce point; l'autre, tension du fil, dirigée vers le point d'attache fixe de ce fil. Ces deux forces ont leur résultante χ horizontale, dirigée du point matériel mobile vers le centre du cercle qu'il décrit. Cela posé, imaginons que, pendant le mouvement, ce point soit à chaque instant projeté sur un même diamètre ML du cercle (*fig.* 37, *Pl. IX*). La projection N se meut comme un point ayant la masse m et sollicité par une force égale à la projection de χ sur ML; or cette projection est exprimée par $\frac{\chi x}{r}$, en appelant x la distance BN et r le rayon BN′ ou BM. Le mouvement oscillatoire de la projection N est donc celui qui aurait lieu en vertu d'une force de la forme fx, en posant $f = \frac{\chi}{r}$, d'où $\frac{m}{f} = \frac{mr}{\chi}$. La durée T d'une oscillation double est donc $2\pi\sqrt{\frac{mr}{\chi}}$. Maintenant rappelons-nous que les forces χ et mg sont proportionnelles aux côtés MB, AB, du triangle ABM, nous aurons ainsi

$$mg : \chi :: h, r : \text{ d'où } \frac{mr}{\chi} = \frac{h}{g} \quad \text{et, par suite,} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}.$$

PRINCIPE DE LA RÉACTION ÉGALE A L'ACTION.

Considérons un point matériel soumis à l'action d'une force constante qui lui fait parcourir une ligne droite d'un mouvement uniformément accéléré. On peut remplacer cette force, quelle qu'elle soit, par un corps qui pousserait ou tirerait le point, de manière à lui faire suivre le même mouvement; auquel cas la force produite par sa liaison au corps serait la même que la première. Or, si l'on réalise cet état de choses en poussant ou en tirant un corps quelconque au moyen d'un ressort dont on puisse négliger la masse, on reconnaîtra qu'il arrive toujours à un état permanent de tension. Il résultera de là, en ne tenant pas compte de la force nécessaire pour produire l'accélération du ressort dont la masse est considérée comme insensible, que ce ressort est sollicité à chaque instant par deux forces en équilibre et, par suite, égales et contraires. Donc l'action exercée à l'une des extrémités du ressort, et qui produit l'accélération, est toujours accompagnée d'une autre action égale et contraire appliquée à l'extrémité qui est liée au corps. Cette dernière force est nommée *réaction* du corps, et les expériences démontrent que *l'action est constamment égale à la reaction* dans tout mouvement où la force est constante et, par conséquent aussi, dans le cas où elle est variable, puisqu'on peut toujours la considérer comme constante dans un intervalle de temps infiniment petit. C'est cette réaction qu'on appelle *force d'inertie*.

Le principe étant établi pour tous les cas où la force est produite par des liaisons matérielles, on l'étend naturellement au cas même où l'on n'aperçoit aucun intermédiaire entre les deux points qui agissent l'un sur l'autre, action qui est toujours dirigée suivant la droite qui les joint. Cette extension est confirmée par l'accord entre les phénomènes observés et les calculs fondés sur cette hypothèse, et d'ailleurs elle peut être démontrée expérimentalement toutes les fois que les corps, entre lesquels a lieu l'action mutuelle, peuvent être liés l'un à l'autre de manière à former un système rigide libre : on reconnaît par l'immobilité de ce système que les deux forces sont contraires et égales.

Nous admettrons donc ce principe général que, *toutes les fois qu'un point matériel produit une action sur un autre, ce dernier exerce toujours une action égale et contraire sur le premier;* de sorte que si ces points venaient à être liés invariablement, les deux actions se détruiraient exactement.

RELATION ENTRE L'IMPULSION DES FORCES ET LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT D'UN SYSTÈME MATÉRIEL.

Soit un système de deux corps élémentaires en mouvement et agissant mutuellement l'un sur l'autre; désignons ces deux corps, ou plutôt leurs masses, par m' et m''; le premier est sollicité par des forces extérieures dont nous désignerons la résultante par F'; une autre résultante extérieure F'' agit sur le second corps. Soit que la distance des deux points matériels varie ou reste constante, m' reçoit de m'' une force $f'_{''}$, et m'' reçoit de m' une force $f'_{'}$ égale et de sens contraire, de sorte que nous pourrons admettre comme principe que, *l'accroissement de la somme des quantités de mouvement projetées sur un axe quelconque est :* 1° *égal à la somme des impulsions des forces extérieures projetées sur le même axe;* 2° *indépendant des actions mutuelles.*

THÉORÈME GÉNÉRAL DU MOUVEMENT DU CENTRE DE GRAVITÉ D'UN SYSTÈME MATÉRIEL.

Si u_0 est la vitesse du centre de gravité d'un système à un instant initial, et u ce que devient cette vitesse après le temps t, on a, d'après la propriété du centre de gravité,

$$\sum mv_x = u_x \sum m \quad \text{et} \quad \sum mv_{0x} = u_{0x} \sum m.$$

Les modifications de la vitesse du centre de gravité en intensité et en direction ne dépendent ni de l'action mutuelle ni du rapprochement ou de l'écartement des points matériels du système, de sorte que l'on peut considérer comme exacte la proposition suivante :

Le centre de gravité d'un système quelconque se meut comme un point matériel qui réunirait à lui seul la masse $\sum$ m *des points du système, et qui serait sollicité par les forces extérieures transportées en ce point parallèlement à elles-mêmes.*

Cette proposition a été désignée sous le nom de *principe de la conservation du mouvement du centre de gravité.*

Les modifications du mouvement du centre de gravité d'un corps ou d'un système de corps quelconque, ne dépendant, comme nous venons de le voir, que de la résultante des forces extérieures fictivement transportées en ce point parallèlement à elles-mêmes, cette force fictive, dont la considération est très-utile, mérite un nom spécial. Nous appellerons *résultante de translation de forces quelconques, celle qu'on obtiendrait par la composition de ces forces, après les avoir transportées en un même point d'application, parallèlement à elles-mêmes, en conservant le sens de leur action.*

Il résulte de la propriété générale énoncée ci-dessus, que la théorie générale du mouvement d'un point matériel sous l'action de forces quelconques, s'applique, sans aucune exception, au mouvement du centre de gravité de tout système matériel, pourvu que, par la pensée, on y concentre toute la masse et qu'on y transporte toutes les forces extérieures.

Ainsi la propriété d'inertie appartient à un système matériel quelconque, en ce sens que son centre de gravité ne peut ni se mettre en mouvement, s'il est actuellement en repos, ni changer actuellement, soit en grandeur, soit en direction, sa vitesse, s'il y en a une, à moins qu'une ou plusieurs forces extérieures n'agissent sur un ou plusieurs points du système. En l'absence de telles forces, le centre de gravité persiste, soit dans le repos, soit dans le mouvement rectiligne uniforme préalablement acquis, et les forces intérieures mutuelles n'ont d'autre effet que de changer la figure du système s'il n'est pas possible, ou de produire des mouvements de rotation. C'est en cela que consiste ce qu'on a appelé la *conservation* du mouvement du centre de gravité.

RELATION ENTRE LE TRAVAIL DES FORCES ET LA FORCE VIVE DU SYSTÈME.

L'accroissement algébrique de la puissance vive du système est égal au travail des forces extérieures, plus à celui des forces intérieures mutuelles, ce dernier travail dépendant uniquement de l'intensité des actions mutuelles et du mouvement relatif des points du système.

Le travail des actions mutuelles est positif dans deux cas : 1° lorsque ces forces sont répulsives et que les points s'éloignent ; 2° lorsque ces forces sont attractives et que les points s'approchent. Il est négatif dans les deux autres cas.

Lorsque le travail résistant l'emporte sur le travail moteur, la puissance vive finale $\sum \frac{1}{2} mv^2$ est plus grande que la puissance vive initiale $\sum \frac{1}{2} mv_0^2$.

Cette proposition s'étend à un système d'un nombre quelconque de points matériels.

Ainsi, dans le cas de quatre points dont les masses seraient m',

m'', m''', m^{iv}, on pose quatre équations comme celles-ci :

$$\frac{1}{2}m'v'^2 - \frac{1}{2}m'v'^2_0 = \text{ϾF}' + \text{Ͼ}f'_{\prime\prime} + \text{Ͼ}f'_{\prime\prime\prime} + \text{Ͼ}f'_{iv},$$

et, en les ajoutant, on aura au premier membre l'accroissement de la puissance vive totale $\sum \frac{1}{2}mv^2 - \sum \frac{1}{2}mv_0^2$: les premiers termes des seconds membres donneront la somme de travail des forces extérieures désignées par $\sum$ ϾF ; enfin les douze travaux des actions mutuelles se réuniront en six groupes binaires,

$$\text{Ͼ}f'_{\prime\prime} + \text{Ͼ}f''_{\prime}, \quad \text{Ͼ}f'_{\prime\prime\prime} + \text{Ͼ}f'''_{\prime}, \ldots;$$

chacun se réduira à un terme de la forme $\int fdl$; et, en représentant leur somme par $\sum \int fdl$, on aura définitivement l'équation

$$\sum \frac{1}{2}mv^2 - \sum \frac{1}{2}mv_0^2 = \sum \text{ϾF} + \sum \int fdl,$$

qui existe, quel que soit le nombre des points matériels du système. Ce nombre étant n, il y a n termes dans chacune des sommes du premier membre, à moins que quelques points ne soient en repos ; il y a n termes dans la somme de travail des forces extérieures $\sum$ ϾF, à moins que certains points ne soient en repos ou qu'ils ne soient sollicités seulement par les actions mutuelles, ce qui ne peut avoir lieu que lorsqu'on fait abstraction de la pesanteur dont l'action pénètre toutes les parties des corps ; il y a $\frac{n(n-1)}{2}$ termes dans l'expression du travail des actions mutuelles $\sum \int fdl$, si chaque point sollicite tous les autres ; si, au contraire, certains points n'exercent aucune action sur certains autres, pour ces points indifférents deux à deux, la valeur de f est nulle ainsi que son travail $\int fdl$.

Dans les cas ordinaires que présente la nature, les intensités des forces mutuelles représentées ci-dessus par f, ne dépendent pas du mouvement absolu du système, mais seulement du mouvement de ses divers éléments les uns par rapport aux autres. On peut donc énoncer en ces termes l'équation ci-dessus :

L'accroissement de la puissance vive d'un système matériel, entre deux situations quelconques, est égal au travail des forces extérieures entre ces deux situations, plus à celui des actions mutuelles, ce dernier dépendant uniquement de la nature du système et du mouvement relatif de ces parties.

Tel est le théorème général de la puissance vive d'un système matériel ou théorème de l'effet du travail, l'une des propositions de la mécanique rationnelle les plus fécondes en déductions utiles.

THÉORÈME DES VITESSES VIRTUELLES OU DU TRAVAIL VIRTUEL.

Les conditions d'équilibre d'un système quelconque de points ou de corps solides, assujettis à des liaisons arbitraires et soumis à l'action de forces quelconques, peuvent s'exprimer par une seule formule générale, d'une grande importance dans la théorie de l'équilibre et du mouvement.

L'avantage de cette formule, lorsqu'elle sera rigoureusement établie, consistera principalement en ce que les équations particulières de l'équilibre de tout système donné, s'en déduiront par des procédés réguliers de calcul, et que l'on pourra, en quelque sorte, considérer la science de l'équilibre de tous les systèmes de points comme y étant renfermée tout entière. Nous commencerons par faire connaître quelques dénominations généralement adoptées.

Lorsque l'on considère un système quelconque de points dans une première position, et que l'on suppose ensuite que chacun d'eux soit placé dans une position infiniment voisine de celle qu'il occupait, sans cesser de satisfaire à toutes les conditions qui dépendent de la nature du système, on nomme *vitesse virtuelle* d'un quelconque de ces points la droite qui joint sa premiere position à la seconde. Cette dénomination vient de ce que l'on peut concevoir que ce déplacement se fasse avec uniformité dans un même temps infiniment petit, et qu'alors les espaces parcourus sont proportionnels aux vitesses, et en outre de ce que ce déplacement n'est que possible et ne s'effectue réellement pas.

La vitesse virtuelle d'un point, *estimée suivant une direction déterminée*, est la projection de cette vitesse sur cette direction; elle est regardée comme positive quand la direction du déplacement du point, en passant de sa première position à la seconde, fait un angle aigu avec celle suivant laquelle on estime la vitesse; elle est négative quand cet angle est obtus. De sorte qu'on obtient en grandeur et en signe la vitesse d'un point, estimée suivant une direction quelconque, en multipliant la grandeur absolue de cette vitesse par le cosinus de l'angle que sa direction fait avec celle suivant laquelle on l'estime.

On appelle mouvement virtuel d'une force le produit de son intensité par la vitesse virtuelle de son point d'application, estimée suivant la direction de la force.

Des forces qui, agissant sur un point, donnent une résultante nulle, sont dites en équilibre.

On dit aussi, suivant une expression généralement reçue, que *ces forces se détruisent*, bien qu'en réalité elles ne cessent pas d'exister et d'agir. Si toutes ces forces, excepté une, sont connues, la dernière s'en déduit aisément, soit par une construction géométrique, soit par le calcul, car elle est égale et directement opposée à la résultante des forces connues.

Si parmi les forces appliquées à un point matériel il y en a un certain nombre dont la résultante soit nulle, les modifications du mouvement n'ont lieu qu'en vertu des autres forces; car la résul-

tante de toutes les forces se réduit à la résultante des dernières. Cela est évidemment fondé sur la composition des forces.

Donc, si à des forces agissant sur un point, on en ajoute deux ou un plus grand nombre dont la résultante soit nulle, le mouvement n'est pas changé.

Réciproquement, lorsque plusieurs forces sont telles, qu'on peut les supprimer en conservant toutes les autres, sans changer le mouvement, ces forces sont en équilibre; car leur résultante, si elles en avaient une, se combinant avec la résultante des autres forces, changerait la résultante totale.

Théorème du travail virtuel.

Si un système matériel quelconque est en repos ou en mouvement de translation rectiligne et uniforme, chacun de ses points est en équilibre, sous l'influence des forces extérieures F qui lui sont particulièrement appliquées, et des actions f qu'il reçoit des autres points du système. On dit alors que les forces extérieures F se font équilibre les unes aux autres, au moyen de la constitution physique du système.

Les lois auxquelles sont assujetties les forces intérieures mutuelles des divers systèmes matériels n'étant qu'imparfaitement connues, ce n'est qu'à l'aide d'hypothèses approximativement justifiées par l'expérience, et dans des cas simples, qu'on parvient à déterminer toutes les conditions d'équilibre. Mais, dans tous les cas d'équilibre d'un système matériel quelconque, nous allons voir qu'il existe certaines conditions auxquelles satisfont nécessairement les forces extérieures, quelles que puissent être les forces intérieures; et ces conditions sont implicitement contenues dans une formule unique et d'une simplicité très-remarquable, déduite de la considération du travail des forces.

Soit un système de points matériels m', m'', m''', etc , en équilibre, tandis qu'ils sont soumis à diverses forces, savoir :

1°. A des forces extérieures qui, réduites pour chaque point à une résultante unique, sont respectivement

$$F', F'', F''', \ldots;$$

2°. A des forces intérieures qui sont :

Pour le point m'. . . . . . $f'_{\prime\prime}, f'_{\prime\prime\prime}, \ldots,$

Pour le point m''. . . . . $f''_{\prime}, f''_{\prime\prime\prime}, \ldots.$

Transportons, par la pensée, le point m' dans une position infiniment voisine n', sans tenir compte des obstacles que les points ou corps environnants peuvent opposer en réalité à ce déplacement, et en supposant que les forces F', $f'_{\prime\prime}$, $f'_{\prime\prime\prime}$, etc., qui sollicitent réellement ce point m', l'accompagnent dans ce mouvement purement idéal appelé *mouvement virtuel*. De ce déplacement il résultera pour chacune des forces agissantes sur m' un travail élémentaire que nous appellerons *travail virtuel*, et la somme de tous ces travaux sera exactement nulle, parce que le travail total d'un nombre de forces appliquées à un même point est égal au travail de leur résultante, et parce qu'ici la résultante des forces considérées comme appliquées au point m' en mouvement est nulle; nous aurons donc, en remplaçant par la notation $\mathfrak{T}_v$ les mots *travail virtuel*,

$$\mathfrak{T}_v F' + \mathfrak{T}_v f'_{\prime\prime} + \mathfrak{T}_v f'_{\prime\prime\prime} + \ldots.$$

En d'autres termes, si par la position du point m' du système on décrit un arc infiniment petit $m'n'$ ou ds' d'une direction quelconque, on aura toujours la relation

$$F' ds' \cos(F', ds') + f'_{''} ds' \cos(f'_{''} ds') + f'_{'''} ds' \cos(f'_{'''} ds') + \ldots = 0,$$

ce qui est évident, puisque, par la suppression du facteur commun ds', cette équation revient à dire que, lorsque plusieurs forces appliquées à un même point sont en équilibre, la somme algébrique de leurs projections sur un axe est nulle, quelque direction qu'on donne à cet axe.

Ce que nous venons de faire pour l'élément m' peut être fait pour le reste du système dont nous imaginerons que chaque point subisse un déplacement infiniment petit, qu'on peut d'abord supposer quelconque, et par conséquent indépendant du mouvement idéal attribué aux autres points. Nous aurons ainsi pour chaque point une équation analogue à la précédente, savoir :

$$\text{pour } m'' \ \ldots\ldots \quad \mathfrak{T}_r F'' + \mathfrak{T}_r f''_{,} + \mathfrak{T}_r f''_{''} + \ldots = 0,$$
$$\text{pour } m''' \ \ldots\ldots \quad \mathfrak{T}_r F''' + \mathfrak{T}_r f'''_{,} + \mathfrak{T}_r f'''_{''} + \ldots = 0,$$

et ainsi de suite pour tous les éléments du système.

Ajoutons ensemble toutes ces équations, en réunissant dans une notation unique tous les travaux virtuels des forces extérieures, et dans une autre tous les travaux virtuels des forces intérieures, nous obtenons la formule générale

$$\sum \mathfrak{T}_r F + \sum \mathfrak{T}_r f = 0,$$

qui signifie que la somme algébrique des travaux virtuels de toutes les forces tant extérieures qu'intérieures est nulle lorsque l'équilibre existe.

Pour débarrasser la formule de la considération des forces intérieures, il suffit de remarquer que parmi tous les mouvements virtuels imaginables, il en est une infinité dans lesquels le travail virtuel total des forces mutuelles est nul, tels sont les mouvements virtuels compatibles avec l'hypothèse de la parfaite solidité du système.

Si l'on réduit à ce seul genre les mouvements virtuels imprimés au système matériel, l'équation se réduit à celle-ci :

$$\sum \mathfrak{T}_r F = 0,$$

c'est-à-dire que dans tout mouvement virtuel compatible avec l'hypothèse de la solidité parfaite du système, la somme algébrique des travaux virtuels des forces extérieures est nulle lorsque l'équilibre existe.

Corollaire. — *Pour qu'un corps solide soit en équilibre, c'est-à-dire pour que, d'abord au repos, il y persiste, il suffit que la somme algébrique du travail virtuel des forces extérieures soit nulle pour tous les mouvements du corps compatibles avec la condition de solidité.*

Lorsqu'il s'agit d'un corps ou système matériel susceptible de déformation, les mêmes conditions générales d'équilibre sont encore nécessaires, mais ne sont pas suffisantes.

Cas particuliers des forces situées dans un même plan.

Si autant de forces qu'on voudra, appliquées à un corps solide, sont dans un même plan, ce fait équivaut à trois des conditions d'équilibre, et il ne reste qu'à vérifier les trois autres. En effet, qu'on prenne les axes Ox, Oy dans le plan qui contient toutes les forces; les moments par rapport à ces axes seront nuls, et si l'on choisit l'axe Oz perpendiculaire à ce même plan, la somme $\sum F_z$ des projections des forces sur cet axe sera nulle. Les conditions qui resteront nécessaires et suffisantes seront exprimées par les équations

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum m_{oz} F = 0.$$

La quantité $\sum M_{oz} F$ est la somme algébrique des moments des forces par rapport à l'axe Oz perpendiculaire au plan des forces. Dans ce cas, on dit ordinairement que les moments sont pris par rapport au point O où l'axe perce le plan des forces.

Il résulte de ces mêmes considérations, que les conditions d'équivalence de deux systèmes de forces situées dans un plan se réduisent à trois, savoir deux équations de projections et une équation de moments, qui sont :

$$\sum F_x = \sum F_{1x}, \quad \sum F_y = \sum F_{1y}, \quad \sum m_{oz} F = \sum m_{oz} F_1.$$

Théorème. — *Si trois forces sont en équilibre, elles sont dans un même plan.*

Cette proposition s'appuie sur la suivante :

Quand trois droites A, B, C (fig. 38, *Pl. IX*) *ne sont pas dans un même plan, il existe une infinité de droites qui, rencontrant deux d'entre elles, ne sont pas dans un même plan avec la troisième.*

En effet, si des trois droites il y en a deux dans un même plan, soient A et B ces deux droites; sinon, soient A et B deux quelconques des trois droites. Dans les deux cas, soit sur A un point a non situé sur B ni sur C; le plan MN passant par ce point a et par la droite B ne contient pas la droite C, et parmi toutes les droites de ce plan qui concourent en a, une seule, C', est dans un même plan avec C; une seule aussi, B', est parallèle à B: toutes les autres rencontrent B sans rencontrer C.

Il suit de là que trois forces qui ne sont pas dans un même plan ne peuvent être en équilibre; car si l'on prend un axe de moment qui, rencontrant deux d'entre elles, ne soit pas dans un même plan avec la troisième, le moment de celle-ci ne sera pas nul, parce que ni l'un ni l'autre de ses facteurs ne sera nul. Donc trois forces en équilibre sont dans un même plan.

Trois forces en équilibre concourent en un même point, ou sont parallèles entre elles. En effet : 1° si deux d'entre elles concourent, leur moment par rapport au point d'intersection est nul, donc il en est de même de la troisième; 2° si deux des trois forces sont parallèles, leur projection sur une droite perpendiculaire à leur direction est nulle, donc il en est de même de la troisième.

Cas particuliers des forces parallèles dans l'espace.

Si autant de forces parallèles qu'on voudra sont tenues en équilibre par une autre force, cette dernière leur est parallèle; car sa projection sur tout axe perpendiculaire à la direction des premières forces est nulle.

Si autant de forces qu'on voudra, appliquées à un corps solide, sont parallèles, ce fait équivaut à trois des conditions d'équilibre, et il ne reste qu'à vérifier les trois autres. En effet, si l'on prend l'axe Oz parallèle aux forces et les axes Ox et Oy perpendiculaires à Oz, les projections sur Ox et Oy seront nulles, et les moments par rapport à Oz le seront aussi. Les conditions qui restent nécessaires et suffisantes pour l'équilibre, consistent dans la nullité de la somme algébrique des projections sur l'axe Oz et des sommes des moments par rapport aux axes Ox, Oy.

Si l'on convient : 1° de représenter par F l'une quelconque des forces prise avec le signe $+$ ou $-$ selon qu'elle sera dans le sens Oz ou dans le sens contraire; 2° de prendre les axes Ox, Oy perpendiculaires entre eux, et de représenter par x, y, les coordonnées positives ou négatives d'un point quelconque de la droite suivant laquelle agit la force F, les trois conditions à vérifier seront exprimées par les équations

$$\sum F = 0, \quad \sum Fx = 0, \quad \sum Fy = 0.$$

C'est ce qu'il est facile de reconnaître en faisant, sur le sens et la position de la force F, toutes les hypothèses possibles.

Connaissant les positions d'autant de points qu'on voudra par lesquels passent des forces parallèles, d'intensités connues et de même sens, on peut, sans connaître la direction de ces forces, assigner un point par lequel passe nécessairement leur résultante.

Car si l'on appelle M', M'' deux points pris sur leurs directions, la résultante R'' de ces deux forces passe en un point N'' situé sur la droite $M'M''$, et partage cette droite en parties réciproquement proportionnelles aux forces. De même la résultante R''' de R'' et d'une troisième force F''', passant par M''', passe en un point N''' qui partage la droite $N''M'''$ en deux parties réciproquement proportionnelles aux forces $F' + F''$ et F'''.

En procédant ainsi de suite, on arrivera, sans connaître la direction des forces, à trouver un point N, par lequel passe nécessairement leur résultante.

Ce point s'appelle le centre des forces parallèles dont il s'agit.

Si F représente une quelconque des forces du système, x la distance de son point d'application à un plan quelconque, X la distance au même plan du centre des forces parallèles, on peut, sans changer la position de ce point, supposer les forces parallèles au plan considéré, et l'on a par conséquent,

$$R = \sum F, \quad RX = \sum Fx, \quad \text{d'où} \quad X = \frac{\Sigma Fx}{\Sigma F}.$$

En opérant de même par rapport à deux autres plans, on aura

$$Y = \frac{\Sigma Fy}{\Sigma F}, \quad Z = \frac{\Sigma Fz}{\Sigma F}.$$

Ainsi l'on aura les trois coordonnées du centre des forces parallèles, en fonction de celles de leur point d'application.

Il est facile de voir que la même propriété et les mêmes formules subsistent lorsque les forces parallèles se partagent en deux groupes de sens opposés.

Remarque. — Lorsque les forces parallèles sont les poids de points matériels dont se compose un corps solide, le centre de ces forces n'est autre chose que le centre de gravité du corps; car on peut, dans les formules ci-dessus, substituer aux forces F, ou aux poids des points matériels, leurs masses qui leur sont proportionnelles. De là, un moyen de déterminer expérimentalement le centre de gravité d'un corps solide, en le suspendant par deux points différents, ce qui fournit deux droites, dont l'intersection est le centre cherché.

EMPLOI DE LA STATIQUE DANS LES QUESTIONS DE DYNAMIQUE.

Dans un système matériel quelconque en mouvement, chaque point se meut sous l'action de forces qui sont les unes extérieures F, les autres intérieures mutuelles f. Ces forces réelles ont à chaque instant, pour chaque point M, une résultante qui s'appelle *force totale* pour ce point, et que nous désignerons par φ.

En appelant m la masse du point considéré, v sa vitesse à un instant quelconque terminant le temps t, ρ le rayon de courbure de l'arc qu'il décrit à cet instant, il résulte des théorèmes précédemment démontrés :

1°. Que la force φ peut se décomposer en deux forces, l'une tangentielle ψ, l'autre centripète χ, satisfaisant aux équations

$$\psi = m\frac{dv}{dt}, \quad \chi = \frac{mv^2}{\rho};$$

2°. Que si l'on projette le mouvement du point M sur un axe quelconque Ox, on a, suivant les notations convenues,

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\varphi_x}{m}.$$

On sait que v_x est la même chose que $\frac{dx}{dt}$, x étant l'abscisse variable du point M. L'expression $\frac{dv_x}{dt}$ équivaut donc à $\frac{d \times \frac{dx}{dt}}{dt}$, expression qu'on remplace ordinairement par $\frac{d^2x}{dt^2}$, et l'équation précédente devient $m\frac{d^2x}{dt^2} = \varphi_x$.

PRINCIPE GÉNÉRAL DE DYNAMIQUE DE D'ALEMBERT.

En conservant les forces extérieures F, si nous appliquons à chaque point M deux forces égales et opposées, savoir la force φ que nous venons de définir, et la force $-\varphi$ égale et contraire à φ, rien ne sera changé ni au mouvement, ni à l'état moléculaire du système

materiel. Dans cette supposition, attendu que chaque point M se meut comme s'il n'était sollicité que par la force φ, les autres forces F, f et $-\varphi$ appliquées à ce point se font mutuellement équilibre, et par conséquent, en étendant cette considération à tous les points du système, on voit que l'ensemble des forces extérieures F, des forces moléculaires f et des forces fictives $-\varphi$ est tel, que si le système matériel, au lieu d'être en mouvement, était en repos, ce repos subsisterait sous l'action de ces trois espèces de forces.

Il en résulte qu'à un instant quelconque du mouvement d'un système matériel, si, pour chaque point M de ce système, on appelle φ la force totale qui seule produirait les modifications du mouvement de ce point, les forces extérieures F et les forces $-\varphi$ égales et opposées aux forces totales, satisfont à toutes les conditions de l'équilibre du système dans son état moléculaire actuel; de sorte que les forces moléculaires sont les mêmes que si le système, sans changer de figure, était en repos sous l'action des forces F et $-\varphi$, tandis que le système, arrivé à son état actuel de mouvement, en vertu des forces qui ont précédemment agi sur lui, continue à se mouvoir comme si chacun de ses points était sollicité par la force totale φ correspondante à ce point, et que les forces F et les actions moléculaires cessassent d'exister.

La considération de l'équilibre, pendant le mouvement des forces réelles F et f extérieures et moléculaires et des forces $-\varphi$ fictivement appliquées aux points matériels du système constitue, au fond, ce qu'on appelle le *principe général de dynamique de d'Alembert*. Son caractère est de ramener tous les problèmes de mouvement à des problèmes d'équilibre.

D'après ces explications, le principe de d'Alembert peut s'énoncer en ces termes :

Dans le mouvement d'un système matériel quelconque, il y a constamment équilibre entre les forces extérieures agissant sur le système, les actions moléculaires, et les forces d'inertie qui correspondent au mouvement varié et curviligne des divers éléments du système.

PROPRIÉTÉS DES FORCES ÉQUIVALENTES DANS LE MOUVEMENT D'UN CORPS SOLIDE.

On ne change rien au mouvement d'un corps solide, si l'on remplace les forces extérieures F qui le sollicitent par des forces équivalentes F_1.

En effet, quel que soit le mouvement nécessairement déterminé qui a lieu à partir d'un état initial donné du système, chaque point se meut comme s'il était sollicité uniquement par une certaine force φ; imaginons que nous appliquions à tous les points du système tout à la fois les forces φ et leurs opposées $-\varphi$, rien ne sera changé; seulement les forces F et $-\varphi$ seront en équilibre, ou elles se détruiront, tandis que les forces φ produiront, en vertu des vitesses initiales, toutes les circonstances du mouvement. Or si dans cet état on remplace les forces F par leurs équivalentes F_1, le système étant supposé parfaitement solide, l'équilibre avec les forces $-\varphi$ subsistera, par suite des modifications que subiront les actions moléculaires;

donc tous les points continueront d'obéir aux forces φ, comme si ces points séparément étaient libres : donc il n'y aura rien de changé au mouvement.

Corollaire. — *On ne change rien au mouvement d'un corps solide, si l'on ajoute ou si l'on supprime des forces en équilibre.*

Du mouvement le plus général d'un corps solide.

Quel que soit le mouvement d'un corps soumis à des forces extérieures F constantes ou variables, les modifications du mouvement du centre de gravité ne dépendent que de la résultante de translation et de la masse totale du corps. En supposant qu'on ait calculé d'après ce principe la situation à chaque instant du centre de gravité d'un corps, il ne reste plus, pour connaître le mouvement *f* du corps dans toutes ses parties, qu'à déterminer son mouvement relatif à des mobiles qui se transporteraient à eux-mêmes en passant constamment par le centre de gravité. Ce mouvement relatif, dans le cas où le corps est solide, est un mouvement de rotation autour du centre de gravité, puisque ce centre est considéré comme fixe et que ses distances aux divers points du corps sont alors constantes; mais il est possible que chaque point ne décrive pas un cercle.

Le mouvement relatif dont nous venons de parler pourra être traité comme un mouvement absolu, si à chaque point du corps dont la masse est *m* on applique en outre des forces extérieures réelles F, une force —F, égale et directement opposée à la force d'entraînement. Or, toutes les forces ainsi introduites étant parallèles et proportionnelles aux masses (puisque les axes mobiles ont un mouvement de translation) et le corps étant solide, toutes ces forces ont une résultante qui passe par le centre de gravité et qu'on peut leur substituer. Dans le mouvement relatif, considéré comme absolu, le centre de gravité est fixe; donc cette résultante est sans influence sur le mouvement de rotation, et il ne reste pour le produire que les seules forces réelles F. C'est ce qui établit la proposition suivante :

Le mouvement de rotation d'un corps solide autour de son centre de gravité, relativement à des axes qui, passant par ce point, restent constamment parallèles à leurs directions initiales, est celui qui aurait lieu, si le centre de gravité était fixe, les forces extérieures hors de ce point restant les mêmes qu'elles sont.

On peut encore exprimer cette proposition d'une manière plus abrégée en disant : *Le centre de gravité d'un corps solide se meut comme si toutes les forces y étaient transportées, et le corps tourne autour de ce point comme s'il était fixe.*

THÉORIE DE LA RÉSISTANCE DES SOLIDES.

Lorsque l'on est chargé de l'exécution d'un édifice, d'une machine, en un mot, d'une construction quelconque, on a besoin de se rendre compte non-seulement des efforts auxquels seront soumis les matériaux que l'on y emploiera, mais aussi du mode de résistance de ces matériaux dans les différentes circonstances où ils se trouvent placés. Si l'on n'avait pas les connaissances nécessaires pour calculer ces efforts, et les dimensions à donner aux matériaux qui les suppor-

teront, on serait exposé ou à faire des ouvrages trop faibles, ou à prodiguer la matière en pure perte.

Il y a donc un grand intérêt à savoir calculer la résistance des divers matériaux dans les circonstances qui se présentent le plus fréquemment.

Les principes développés dans le Cours de Mécanique et les applications que nous en avons données suffisent pour déterminer l'intensité et les points d'application des forces qui se développent dans l'édifice ou dans la machine que l'on projette. Mais le mode de résistance des matériaux à l'action de ces forces demande à être étudié d'une manière particulière, et nous allons chercher à présenter les points principaux de cette théorie, et à démontrer les formules nécessaires pour les applications que l'on peut en faire.

On entend par résistance d'un corps solide l'effort qu'il faut employer pour changer la figure de ce corps en le fléchissant, ou bien pour en séparer les parties et le rompre. La théorie de la résistance des solides se propose deux objets :

1°. Etant donnés la figure d'un corps, sa nature et les efforts exercés sur lui, reconnaître si ce corps doit fléchir et de quelle quantité, ou s'il doit rompre.

2°. Etant donnés la nature d'un corps et les efforts exercés sur lui, déterminer sa figure, de manière à lui procurer la plus grande résistance possible sous le moindre volume.

Les corps sont composés de parties ou molécules maintenues à certaines distances les unes des autres par des forces opposées qui se font mutuellement équilibre. Le jeu de ces forces d'attraction et de répulsion rend raison des principaux phénomènes qui se manifestent quand on entreprend de modifier la figure des corps. C'est évidemment dans la considération des forces dont on vient de parler qu'il faut chercher la solution directe et générale des problèmes relatifs à la résistance des solides.

Les actions auxquelles les matériaux employés dans les constructions se trouvent soumis, peuvent être distinguées en diverses sortes : ces matériaux sont tirés ou comprimés dans le sens de leur longueur, fléchis par des forces qui tendent à les faire plier ou rompre, ou tordus autour d'un axe de rotation.

DE LA RÉSISTANCE A UN EFFORT DE TRACTION.

La résistance d'un corps prismatique, tiré dans le sens de sa longueur, peut être considérée comme proportionnelle à l'aire de la section transversale, le corps étant supposé homogène.

Les indications suivantes contiennent les résultats de quelques expériences :

	PESANTEUR spécifique.	RÉSISTANCE sur 0m,01 carré.
		k
Pierre calcaire blanche d'un grain fin et homogène..	»	14,40
— dure de Givry.......	2,36	20,10
— tendre de Givry..................	2,07	7,40
Brique très-bien cuite........................	»	19,40
Plâtre moyennement........................ ...	»	4,00
La force avec laquelle il adhère aux pierres ou briques n'est guère que les $\frac{2}{3}$ de la précédente. Elle est plus grande pour la pierre meulière ou la brique que pour les pierres calcaires; elle diminue beaucoup avec le temps.		
Mortier. — D'après les expériences de M. Rondelet, la résistance du mortier à un effort de traction est environ $\frac{1}{8}$ de sa résistance à l'écrasement; son adhérence à la plupart des pierres et aux briques est plus grande que la sienne propre.		

D'après M. Vicat :

	RÉSISTANCE par centimètre carré
	k
1°. Mortiers bien faits à sable quartzeux et chaux éminemment hydraulique..	9,60
2°. Mortiers bien faits à chaux hydrauliques ordinaires et sable quartzeux..	6,00
3°. Mortiers bien faits à chaux communes, moyennes ou grasses et sable quartzeux..	3,60
4°. Mortiers mal faits, au plus............................	1,50
	par ligne carrée.
Bois de chêne, d'après les expériences de M. Rondelet...........	102 livres.
Fer fondu..	4680 k
Fer forgé, fil de fer, d'après Buffon........................	5950

Cordages. — D'après les expériences de Duhamel, d étant le diamètre d'une corde blanche en centimètres, elle porte moyennement jusqu'à 400 d^2 kilogrammes.

D'après Coulomb, les cordes blanches portent jusqu'à 50 à 60 kilogrammes par fil de caret, mais on ne doit jamais les charger de plus de 40 kilogrammes.

Les cordes goudronnées ne portent que les $\frac{2}{3}$ ou les $\frac{3}{4}$ des cordes blanches.

DE LA RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT.

Voici les résultats obtenus par expériences sur les divers matériaux :

Pierres. — La force nécessaire pour écraser un morceau de pierre est *pour des figures semblables* proportionnelle à l'aire de la section transversale. Elle diminue quand le pourtour de cette section augmente par rapport à son aire. Elle est la plus grande, quand la section transversale est un carré ou un cercle.

Quant à l'influence de la hauteur d'une pierre comparée à sa section, la force nécessaire pour produire l'écrasement est la plus grande quand la pierre a la forme d'un cube; elle diminue à mesure que la pierre s'aplatit ou s'allonge.

Il a été fait un grand nombre d'expériences sur la résistance des pierres à l'écrasement.

Les expériences de M. Rondelet étaient faites sur des cubes de 0,05 de côté.

Le tableau suivant est extrait de ceux qu'il a publiés.

	PESANTEUR spécifique.	POIDS PORTÉ sur une base de $0^m,25$ carré.
1°. PIERRES VOLCANIQUES.		k
Basalte de Suède	3,06	47809,00
Basalte d'Auvergne	2,88	51945,00
Lave du Vésuve	2,60	14802,00
2°. GRANITES.		
Granite vert des Vosges	2,85	15487,00
Granite gris de la Bretagne	2,74	16353,00
Granite de Normandie	2,66	17555,00
3°. GRÈS.		
Grès très-durs (roussâtres)	2,52	20337,00
Grès blancs	2,48	23086,00
Grès tendre	2,49	23098,00
4°. PIERRES CALCAIRES.		
Marbres noirs de Flandre	2,72	19719,00
Marbres blancs veinés	2,70	7455,00
Marbre blanc statuaire	2,69	8176,00
Marbre blanc Turquie	2,67	7695,00
Pierre à plâtre de Montmartre, près Paris	1,92	1785,00
Vergelée des environs de Paris et lambourde des environs de Paris	1,56	575,00

Dans les constructions on ne doit faire porter aux pierres qu'un poids beaucoup moindre que ceux contenus dans le tableau précédent. On peut se laisser guider à cet égard par la note suivante des pressions exercées sur $0^m,25$ carrés de pierre dans les constructions considérées comme les plus hardies.

	k
Piliers du dôme de Saint-Pierre de Rome	409,00
Piliers du dôme de Saint-Paul de Londres	484,00
Piliers du dôme des Invalides	369,00
Piliers du dôme de Sainte-Geneviève	736,00
Piliers de la tour de l'église de Saint-Merry	735,00
Colonnes de l'église de Toussaint d'Angers	1107,00

Remarque. — On doit avoir égard à la manière dont la pression se répartit sur la surface des pierres, parce qu'il arrive souvent qu'elles sont pressées plus d'un côté que de l'autre.

	k
Briques de Bourgogne	3700,00
Plâtre gâché à l'eau, d'après M. Rondelet	1239,00

Mortier. — La résistance du mortier est très-variable, suivant les matières employées et les procédés de fabrication. Le tableau suivant est dressé selon les expériences de M. Rondelet.

	PESANTEUR spécifique.	k
Mortier de chaux et sable de rivière	1,63	767,00
Le même, battu	1,89	1048,00
Mortier de chaux et de sable de mine	1,59	1017,00
Le même, battu	1,90	1406,00
Mortier de ciment en tuileaux pilés	1,46	1191,00
Le même, battu	1,66	1633,00
Mortier en grès pilé	1,68	733,00
Mortier de pouzzolane de Naples et de Rome, mêlées	1,46	916,00
Le même, battu	1,68	1333,00
Enduit d'une conserve antique des environs de Rome	1,55	1903,00
Enduit en ciment des démolitions de la Bastille	1,49	1308,00

Des expériences ont été faites dix-huit mois après la fabrication des mortiers. Quinze ans après, elles ont été répétées, et l'on a reconnu que la consistance avait environ augmenté de $\frac{1}{8}$ pour les mortiers de chaux et sable, et de $\frac{1}{4}$ pour les mortiers de ciment et pouzzolane.

D'après M. Rondelet, la force nécessaire pour écraser un cube de bois de chêne est moyennement de 44 livres par ligne carrée de la base. Elle ne diminue pas sensiblement pour un prisme dont la hauteur ne surpasse pas sept à huit fois l'épaisseur et qui ne peut plier.

Cette force pour le sapin est moyennement de 52 livres.

Métaux.

D'après les mêmes expériences, pour écraser un cube de fer fondu de $\frac{1}{4}$ de pouce anglais de côté, il faut un effort de

9773	livres avoir-du-poids	fer pris dans une masse.
10114	— —	coulé horizontalement.
11137	— —	coulé verticalement.

La section transversale étant toujours un carré de $\frac{1}{4}$ de pouce de côté et la hauteur variant de $\frac{1}{2}$ pouce à 1 pouce, l'effort pour écraser varie de 9698 à 6321 livres avoir-du-poids pour le fer coulé horizontalement.

L'effort pour écraser un cube de $\frac{1}{4}$ de pouce de côté en cuivre coulé est de 7318 livres avoir-du-poids.

DE LA RÉSISTANCE A LA RUPTURE.

En parlant de la résistance des solides à la rupture, on a principalement en vue les corps d'une figure prismatique ou au moins allon-

gés dans le sens d'une de leurs dimensions, lesquels seraient rompus dans une de leurs sections transversales.

Tous les corps fléchissent avant de rompre ; ils fléchissent plus ou moins suivant leur nature et suivant leur grosseur comparée à leur longueur. La théorie de la résistance à la rupture fait abstraction de cette circonstance, et ne considère aucun changement de figure dans les corps avant l'instant où la rupture a lieu.

Solide encastré chargé d'un poids à son extrémité libre. — Lorsqu'un corps est placé horizontalement et se trouve maintenu dans une position telle, que l'une de ses extrémités étant encastrée invariablement, l'autre soit libre, si l'on vient à le charger d'un poids, il se courbera, et dans ce mouvement toutes ses fibres n'agiront point de la même manière. Ainsi, soit AB ce corps (*fig.* 39, *Pl. IX*), à l'extrémité duquel est fixé un poids P ; il prendra sous l'influence de ce poids la forme curviligne AmB'. Dans ce changement de forme, la face supérieure se sera allongée, tandis que la face inférieure se sera raccourcie d'une égale quantité, et que la ligne milieu AB', à laquelle on donne le nom d'*axe neutre*, n'aura éprouvé ni allongement ni raccourcissement. Ce mouvement de flexion se continuera jusqu'à ce que le poids soit maintenu en équilibre par la réaction des forces moléculaires ou d'élasticité. Dans ce mouvement d'équilibre on voit que, par l'effet du changement de forme supposé très-faible, les fibres du corps qui sont situées au-dessus de la ligne AB' se sont allongées d'autant plus qu'elles étaient plus éloignées de cette ligne ; que celles qui sont au-dessous se sont raccourcies, et qu'une section normale au prisme est restée normale à la courbe.

Soient ab et $a'b'$ deux sections infiniment voisines perpendiculaires au prisme (*fig.* 40, *Pl. IX*). Avant la flexion elles étaient parallèles, après elles sont devenues normales à l'axe neutre oo', et leurs plans se rencontrent en un point C. Dans cette position, si je considère une fibre située à une distance $om = v$ de l'axe neutre, je vois, en menant ok parallèle à Ca', que l'allongement de cette fibre est représenté par mk, et que si je compare les deux triangles omk et oCo' qui sont semblables, j'aurai

$$mk : om :: oo' : Co, \quad \text{d'où} \quad mk = \frac{om \times oo'}{Co}.$$

Co est le rayon de courbure de la courbe, c'est-à-dire le rayon du cercle passant par les deux points que nous avons considérés ; en le désignant par Q nous aurons

$$mk = \frac{om \times oo'}{Q} = \frac{v \times oo'}{Q};$$

ainsi l'allongement proportionnel sera $\frac{v}{Q}$.

La force nécessaire pour produire l'allongement d'une fibre est égale à cet allongement multiplié par le module d'élasticité ; ainsi dans ce cas, en représentant par E le module d'élasticité, elle sera $\frac{Ev}{Q}$, et sur un élément $d\omega$ elle deviendra $\frac{Ev\,d\omega}{Q}$.

C'est l'expression de la réaction élastique produite par l'extension de la fibre *mm'*. Si l'on considère une fibre *nn'* placée au-dessous de l'axe neutre à une distance v_1, on verra que son raccourcissement proportionnel est de même $\frac{v_1}{Q}$, et que sa réaction élastique, agissant en sens contraire de la première, est exprimée par $\frac{Ev_1 d\omega}{Q}$.

Si, comme dans le cas que nous considérons, la pièce est soumise à une force perpendiculaire à sa direction, et ne développant pas de forces dans le sens des fibres, il faudra, pour l'équilibre, que l'on ait

$$\frac{SEv d\omega}{Q} = \frac{SEv_1 d\omega}{Q}, \quad \text{ou} \quad Svd\omega = Sv_1 d\omega;$$

c'est-à-dire que l'axe neutre passera par le centre de gravité de la section.

Si la force qu'oppose une fibre à l'extension ou à la compression est représentée par $\frac{Evd\omega}{Q}$, le moment de cette force sera $\frac{Ev^2 d\omega}{Q}$ et celui des forces réunies de toutes les fibres sera

$$(1) \qquad \frac{SEv^2 d\omega}{Q} = \frac{E}{Q} Sv^2 d\omega.$$

Cette expression est connue sous le nom de *moment d'élasticité*, parce qu'elle donne le moment de la résistance d'une pièce soumise à la flexion en fonction de la quantité E que nous avons nommée *coefficient d'élasticité*.

Le moment de la résistance d'une pièce peut encore s'exprimer en fonction de la résistance absolue de la matière qui compose cette pièce, ou plutôt en fonction du plus grand effort auquel on veut soumettre les fibres les plus tendues ou les plus comprimées du corps.

Soit, en effet (*fig.* 41, *Pl. IX*), R le plus grand effort auquel on veut soumettre la fibre la plus tendue de la force connue; si nous appelons v' la distance de cette fibre à l'axe neutre, l'effort exercé sur une fibre élémentaire placée à une distance v du même axe ou sa résistance qui fait équilibre à l'effort, sera exprimée par $\frac{Rv}{v'}$, puisque évidemment l'effort sera proportionné à l'extension, et que dans les triangles semblables *oaa'* et *obb'*, on aura, en appelant x l'effort cherché,

$$x : R :: v : v',$$

d'où nous conclurons que la résistance sur un élément dont la section est $d\omega$ devra être représentée par $\frac{Rvd\omega}{v'}$, et le moment de cette résistance élémentaire par $\frac{Rv^2 d\omega}{v'}$; ainsi le moment de la résistance totale sera

$$(2) \qquad \frac{SRv^2 d\omega}{v'} = \frac{R}{v'} Sv^2 d\omega.$$

On se servira de l'expression (1) quand on aura à mesurer l'élasti-

cité ou la flexion d'une pièce, et de l'expression (2) quand on voudra calculer ses dimensions pour résister à un effort donné. Les moments de résistance des pièces prismatiques que nous venons de poser (1) et (2) doivent être égaux au moment de la force qui infléchit les prismes, pris par rapport à la section de la pièce que nous considérons. En effet, soit AB (*fig.* 42, *Pl. IX*) une pièce encastrée en A, chargée à son extrémité d'un poids P et infléchie sous l'action de ce poids; nous considérerons cette flexion comme assez faible pour que la ligne AC puisse être prise pour la ligne AB et Bm pour Cn. Nous ferons

$$AC = l, \quad CB = f, \quad An = x, \quad mn = y.$$

Si la section pour laquelle nous avons pris les moments d'élasticité et de résistance passe au point m, le moment de la force P devra être pris par rapport à ce point, et nous aurons

$$(3) \qquad \frac{E}{Q} S v^2 d\omega = P(l - x),$$

et

$$(4) \qquad \frac{R}{v'} S v^2 d\omega = P(l - x).$$

Lorsque la pièce est prismatique, la quantité $S v^2 d\omega$ est constante pour toutes les sections de la pièce, par conséquent le point de plus grande section est en A, puisque c'est en ce point que le moment de la force P est le plus grand. Si nous appelons I cette quantité qui est le moment d'inertie de la section de la pièce, nous aurons donc pour le second moment, pris par rapport au point A où $x = 0$, $\frac{RI}{v'} = Pl$; et nous pourrons avec cette formule calculer les dimensions à donner à la pièce, pour que les fibres les plus tendues ou les plus comprimées ne soient pas soumises à un effort plus grand que R.

Quant au premier moment, celui de l'élasticité, il dépend, comme on voit, du rayon de courbure Q. On nomme *rayon de courbure* d'une courbe dont l'équation est $y = fx$, le rayon du cercle qui a trois points communs avec cette courbe, ou celui qui, ayant un point commun avec cette courbe, a de plus pour $\frac{dy}{dx}$ et pour $\frac{d^2y}{dx^2}$ des valeurs égales à celles de la courbe. Dans le cas dont nous nous occupons, la flexion étant très-petite, la tangente au point que l'on considère est sensiblement horizontale ou perpendiculaire au plan de l'encastrement, ainsi $\frac{dy}{dx} = 0$ ou $dy = 0$; on n'a plus alors pour déterminer le rayon de courbure que sa différentielle seconde.

Soient $An = nC = dx$ (*fig.* 43, *Pl. IX*), $Cm = d^2y$, $AO = Q$ le rayon de de courbure; on aura les deux triangles semblables Aon, nCm qui donneront

$$AO = Q : dx :: dx : d^2y, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{d^2x^2}{d^2y};$$

substituant dans l'équation (3), nous aurons

$$\frac{E\, d^2y}{d^2x^2} S v^2 d\omega = P(l - x),$$

et en faisant $\mathrm{ES}v^2 d\omega = \mathcal{E}$,

(5) $$\frac{\mathcal{E}}{\mathrm{Q}} = \mathcal{E}\frac{d^2 y}{dx} = \mathrm{P}(l-x)\,dx.$$

Si le corps est un prisme pour lequel $\mathcal{E}$ est constant dans toute l'étendue de la pièce, il viendra

$$\mathcal{E}\frac{dy}{dx} = \mathrm{P}\left(lx - \frac{x^2}{2}\right),$$

puis

(6) $$\mathcal{E}y = \mathrm{P}\left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right).$$

Les constantes sont nulles puisque l'on a à la fois $\frac{dy}{dx} = 0$, $x = 0$ et $y = 0$. A l'extrémité de la pièce, on a $y = f$ et $x = l$; si l'on substitue ces valeurs dans l'équation (6), on aura $\mathcal{E}f = \frac{\mathrm{P}l^3}{3}$. On pourra donc, connaissant $\mathcal{E}$, déterminer la flèche quand on connaîtra la charge P, et réciproquement.

On voit, d'après cet exemple, que dans chaque cas particulier il faudra chercher l'expression de I ou de $\mathrm{S}v^2 d\omega$; que, par conséquent, la première chose à faire est de trouver $\mathrm{S}v^2 d\omega$ pour les différentes formes de corps dont on fait usage dans les constructions.

Solide encastré et chargé d'un poids à son extrémité et en outre de poids uniformément répartis.

Lorsqu'une pièce est encastrée par un bout et chargée d'un poids à l'autre extrémité, nous avons trouvé pour le moment de la force qui produit la flexion, $\mathrm{P}(l-x)$; si la pièce est en outre chargée uniformément d'un poids p par mètre de longueur, la résultante de ces poids sera placée au milieu de l (*fig.* 42, *Pl. IX*), et le moment de cette seconde charge sera $\frac{1}{2}p(l-x)^2$, de sorte que l'on aura

(1) $$\mathrm{P}(l-x) + \frac{p}{2}(l-x)^2 = \mathcal{E}\frac{d^2 y}{dx^2}$$

ou

(2) $$\mathrm{P}(l-x) + \frac{p}{2}(l-x)^2 = \frac{\mathrm{RI}}{v};$$

la plus grande valeur du premier terme répond évidemment à $x = 0$; ainsi, pour calculer la résistance, on prendra

$$\frac{\mathrm{RI}}{v} = \mathrm{P}l + \frac{pl^2}{2} = \left(\mathrm{P} + \frac{pl}{2}\right)l.$$

On obtiendra la flèche au moyen de l'équation (1); en effet, on aura

(3) $$\mathcal{E}y = \mathrm{P}\left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) = \frac{p}{2}\left(\frac{l^2x^2}{2} - \frac{lx^3}{3} + \frac{x^4}{12}\right).$$

Et si pour avoir la flèche à l'extrémité, on fait $x = l$ et $y = f$, il viendra

(4) $$\mathcal{E}f = \frac{\mathrm{P}l^3}{3} + \frac{3}{24}pl^4.$$

Si l'on observe que pl est la charge uniformément répartie, on voit que la flèche est la même que si l'on avait ajouté au poids P les $\frac{3}{8}$ de cette charge uniforme.

Dans le cas où il n'y aurait pas de poids à l'extrémité de la pièce, il faudrait faire $P = 0$ dans l'équation (2), et il viendrait

$$\frac{p}{2}(l-x)^2 = \frac{RI}{v'},$$

et pour le cas de la pièce rectangulaire,

$$(5) \qquad \frac{p}{2}(l-x)^2 = \frac{Rab^2}{6}.$$

Pièce posée sur deux appuis et chargée en son milieu.

Soit ACB (*fig.* 44), une pièce dont la longueur est l et qui repose sur deux appuis placés au même niveau en A et B; soit P la charge appliquée au milieu de la pièce. Chacun des appuis supportera un poids $\frac{P}{2}$, et l'on pourra les supposer remplacées par des forces $\frac{P}{2}$ agissant de bas en haut, de sorte que la pièce devra être considérée comme en équilibre sous l'action des forces $-\frac{P}{2}+P$ et $\frac{-P}{2}$, et qu'à raison de la symétrie qui fait que la tangente à la courbe en C est horizontale, chaque moitié sera dans la même position qu'une pièce encastrée. Si donc on place l'origine des coordonnées en C, on aura pour l'équation d'équilibre en un point m dont l'abscisse est x,

$$(1) \qquad \frac{\mathcal{E}\,d^2y}{dx^2} = \frac{P}{2}\left(\frac{l}{2}-x\right)$$

ou

$$(2) \qquad \frac{RI}{v'} = \frac{P}{2}\left(\frac{l}{2}-x\right).$$

Lorsque la pièce est prismatique, les valeurs de I et de v' sont constantes pour tous les points; par conséquent, la plus grande valeur de R correspond à $x = 0$, c'est-à-dire au point C. On a alors

$$\frac{RI}{v'} = \frac{Pl}{4}.$$

Si l'on veut calculer la flèche, on obtiendra l'équation

$$\mathcal{E}\frac{dy}{dx} = \frac{P}{2}\left(\frac{l}{2}x - \frac{x^2}{2}\right).$$

La constante est nulle, puisque $\frac{dy}{dx}$ est nulle au point C où la tangente est horizontale; intégrant une seconde fois la formule (1), on aura

$$\mathcal{E}y = \frac{P}{2}\left(\frac{lx^2}{4} - \frac{x}{6}\right).$$

La constante est encore nulle, puisque $y = 0$ pour $x = 0$.

Pour obtenir la plus grande flèche, c'est-à-dire la plus grande

valeur de y, il faudra faire $x = \frac{l}{2}$, ce qui donnera

$$\mathcal{E}f = \frac{Pl^3}{2}\left(\frac{1}{16} - \frac{1}{48}\right) = \frac{Pl^3}{48}.$$

Pièce AB posée sur deux appuis A et B et chargée en un point quelconque C d'un poids P.

Si d et d' (*fig.* 45, *Pl.* X) sont les deux parties de la longueur l de part et d'autre de C, les pressions exercées sur les points A et B seront respectivement $\frac{Pd'}{l}$ et $\frac{Pd}{l}$, et la pièce pourrait être considérée comme en équilibre sous l'action des forces $\frac{-Pd'}{l}$, P et $\frac{-Pd}{l}$. Si l'on compte les abscisses à partir du point A, nous aurons pour la courbe AC

$$\frac{RI}{v'} = \frac{Pd'}{l}x,$$

et pour la courbe CB

$$\frac{R'I}{v'} = \frac{Pd}{l}(l - x).$$

La plus grande valeur de R correspondra, pour la courbe CB, à la plus grande valeur de x ou à $x = d'$, et pour la seconde à la plus petite valeur de x ou $x = d$. On a donc

$$\frac{RI}{v'} = \frac{Pdd'}{l} = \frac{-R'I}{v'}.$$

Pièce AB posée sur deux appuis A et B et chargée uniformément sur sa longueur.

Si p est la charge par unité de longueur (*fig.* 46, *Pl.* X), la charge totale sera pl, et chacun des points d'appui supportera une pression $\frac{pl}{2}$, de sorte que la pièce sera en équilibre sous l'action des deux sous-pressions $-\frac{pl}{2}$ et du poids pl distribué uniformément sur sa longueur, et si l'on fait $An = x$ et $mn = y$, on aura pour l'équilibre de mB

$$(1) \qquad \mathcal{E}\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{p}{2}(l - x)^2 - \frac{pl}{2}(l - x) = \frac{p}{2}(lx - x^2),$$

$\frac{d^2y}{dx^2}$ est négatif parce que la courbe est concave vers l'axe des x.

On aura également

$$(2) \qquad \frac{RI}{v'} = \frac{pl}{2}(l - x) - \frac{p}{2}(l - x)^2 = \frac{p}{2}(lx - x^2).$$

Si la pièce est prismatique, la plus grande valeur de R correspondra à $x = \frac{l}{2}$, c'est-à-dire au milieu de la longueur, et l'on aura

$$\frac{RI}{v'} = \frac{pl^2}{8};$$

pl est la charge totale, en l'appelant P nous aurons $\frac{\mathrm{RI}}{v'} = \frac{\mathrm{P}l}{8}$: nous avons eu $\frac{\mathrm{RI}}{v'} = \frac{\mathrm{P}l}{4}$ quand le poids était placé au milieu de la pièce; *ainsi une pièce porte une charge deux fois plus grande, quand cette charge est répartie uniformément, que quand elle est placée au milieu de la longueur de la pièce.*

Pour connaître la flèche, intégrons l'équation (1), et nous aurons

$$\mathcal{E}\frac{dy}{dx} = \mathrm{C} - \frac{p}{2}\left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{3}\right), \quad \text{puis} \quad \mathcal{E}y = \mathrm{B} + \mathrm{C}x - \frac{p}{2}\left(\frac{lx^3}{6} - \frac{x^4}{12}\right).$$

Pour déterminer les constantes, nous observons que la courbe passant par l'origine des coordonnées, on doit avoir $y = 0$ quand $x = 0$, qu'ainsi $\mathrm{B} = 0$; d'un autre côté, pour $x = l$, on a $y = 0$, puisque la courbe passe par le point B : ainsi on a

$$0 = \mathrm{C}l - \frac{p}{2}\left(\frac{l^4}{6} - \frac{l^4}{12}\right) = \mathrm{C}l - \frac{pl^4}{24}, \quad \text{et, par suite,} \quad \mathrm{C} = \frac{pl^3}{24}.$$

Substituant dans l'équation de la courbe, il viendra

$$\mathcal{E}y = \frac{pl^3}{24}x - \frac{p}{2}\left(\frac{lx^3}{6} - \frac{x^4}{12}\right) = \frac{p}{12}\left(\frac{l^3}{2}x - lx^3 + \frac{x^4}{2}\right);$$

si l'on fait $x = \frac{l}{2}$, on a, en représentant la flèche par f,

$$\mathcal{E}f = \frac{pl^4}{12}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{8} + \frac{1}{32}\right) = \frac{pl^4}{12} \times \frac{5}{32} = \frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pl^4.$$

Pour une pièce chargée en son milieu d'un poids pl, la flèche serait $f' = \frac{1}{4}\frac{\mathrm{P}l \times l^3}{\mathrm{E}ab^3}$, on a donc $\frac{f}{f'} = \frac{5}{8}$. Ainsi dans le cas de la charge uniformément répartie, la flèche est les $\frac{5}{8}$ de ce qu'elle serait si la charge était concentrée au milieu de la pièce.

Pièce posée sur deux appuis A et B, chargée uniformément d'un poids p par mètre de longueur, et, en outre, d'un poids P placé en C, la longueur étant toujours égale à l.

Les réactions aux points A et B (*fig.* 47, *Pl. X*) seront respectivement $\frac{1}{2}pl + \frac{\mathrm{P}d'}{l}$ et $\frac{1}{2}pl + \frac{\mathrm{P}d}{l}$. Ainsi en comptant les x à partir de A, on aura pour l'équilibre, en un point x, y de la courbe AC,

$$(1) \quad \frac{\mathrm{RI}}{v'} = -\frac{1}{2}px^2 + x\left(\frac{1}{2}pl + \frac{\mathrm{P}d'}{l}\right) = \frac{1}{2}px\left(l + \frac{2\mathrm{P}d'}{pl} - x\right).$$

Si l'on imagine un demi-cercle (*fig.* 48, *Pl. X*) dont le diamètre soit égal à $l + \frac{2\mathrm{P}d'}{pl}$, et si sur ce diamètre on prend à partir de A une longueur x, que, par le point ainsi déterminé, on élève une perpendi-

culaire jusqu'à la circonférence, le carré fait sur l'ordonnée du cercle ainsi obtenu sera égal au rectangle fait sur x et sur $l + \frac{2Pd'}{pl} - x$.

Le produit de ces deux quantités varie donc comme le carré de l'ordonnée CE, et la plus grande valeur de l'une de ces quantités correspond au maximum de l'autre.

Si donc AC est plus petit que $\frac{1}{2} l + \frac{2Pd'}{pl}$, le maximum de $\frac{RI}{v'}$ correspondra à $x = d$. Si, au contraire, AC est plus grand que $\frac{1}{2} l + \frac{2Pd'}{pl}$, le maximum correspondra à $x = \frac{1}{2}\left(l + \frac{2Pd'}{pl}\right)$.

Substituant ces valeurs dans l'équation (1), on aura, pour $x = d$,

$$\frac{RI}{v'} = \frac{1}{2} pd \left(l + \frac{2Pd'}{pl} - d\right);$$

observant que $l - d = d'$, substituant et réduisant, on obtiendra facilement

$$(2) \qquad \frac{RI}{v'} = \left(P + \frac{1}{2} pl\right) \frac{dd'}{l},$$

comme si $\frac{1}{2} pl$ était réunie en C à la force P.

Pour $x = \frac{1}{2}\left(l + \frac{2Pd'}{pl}\right)$, on a

$$\frac{RI}{v'} = \frac{1}{2} p \left(\frac{l}{2} + \frac{Pd'}{pl}\right) l + \frac{2Pd'}{pl} - \left(l - \frac{Pd'}{pl}\right) = \frac{p}{2}\left(\frac{l}{2} + \frac{Pd'}{pl}\right)^2;$$

lorsque C est au milieu de AB, $d = d' < \frac{1}{2}\left(l + \frac{2Pd'}{pl}\right)$, et la formule (2) devient

$$\frac{RI}{v'} = \left(P + \frac{1}{2} pl\right) \frac{l^2}{4}.$$

Pièce d'une longueur l posée sur deux appuis A et B et chargée de poids P, P', P″ placés à des distances x, x', x'' du point A.

Si j'appelle q (*fig.* 49, *Pl. X*) la charge supportée par le point A, et q' la charge supportée par le point B, on aura, en prenant les moments par rapport à A,

$$q'l = Pd + P'd' + P''d'',$$

et par rapport à B,

$$ql = P(l - d) + P'(l - d') + P''(l - d''),$$

d'où

$$q + q' = P + P' + P''.$$

On pourra donc déterminer q et q', et considérer la pièce comme tenue en équilibre sous l'action des forces $-q$, P, P', P″, ..., $-q'$.

Pour la partie AC, on aura

$$(1) \qquad \frac{RI}{v'} = \varepsilon \frac{d^2y}{dx^2} = qx.$$

Pour la partie CC′, on aura

$$(2)\qquad \frac{\mathrm{RI}}{v'} = \mathcal{E}\,\frac{d^2y'}{dx'^2} = -\,qx' + \mathrm{P}\,(x' - d).$$

Pour la partie C′C″, on aura

$$(3)\qquad \frac{\mathcal{E}\,d^2y''}{dx''^2} - qx' + \mathrm{P}\,(x'' - d) + \mathrm{P}'\,(x'' - d'),$$

x étant l'abscisse de la courbe AC, x' celle de la courbe CC′ et x'' celle de la courbe C′ C″

La plus grande courbure de la courbe AC ou la plus grande valeur de R correspondra évidemment à la plus grande valeur de x, c'est-à-dire à $x - d$, et se trouve par conséquent en C.

La plus grande courbe de CC′ correspondra à la valeur de x', qui rendra $-\,qx' + \mathrm{P}\,(x' - d)$ un maximum, c'est-à-dire à la plus grande valeur ou à la plus petite valeur de x', soit à $x' = d'$, soit à $x' = d$, et se trouvera en C′ ou en C.

Pour déterminer le point le plus fatigué de la pièce, il faudra calculer les valeurs des seconds membres des équations (1), (2), (3), et prendre le plus grand.

SOLIDES D'ÉGALE RÉSISTANCE A LA RUPTURE.

Les solides prismatiques soumis à divers efforts tendent à rompre dans des points déterminés, nommés *points de moindre résistance*, et qui sont ceux pour lesquels les moments des efforts qui causent la rupture ont la plus grande valeur possible. Dans les autres parties de leur longueur, ces solides ont une résistance plus grande qu'il n'est nécessaire.

On peut se proposer de déterminer la figure d'un solide par la condition que, dans tous les points de sa longueur, le moment de la résistance de la section transversale soit égal au moment des poids qui tendent à accuser la rupture dans cette section. Un solide ainsi déterminé contiendra le moins de matière qu'il est possible, eu égard à l'usage auquel il est destiné.

Voici deux exemples des recherches de ce genre :

1°. Soit un solide encastré horizontalement à une extrémité, chargé à l'autre du poids P (*fig.* 50, *Pl. X*), et dont les faces latérales sont formées par deux plans verticaux parallèles.

Si l'on représente par x l'abscisse Bp, par v l'ordonnée pm de la courbe qui détermine la figure du solide, par a la largeur du solide, et par r la résistance du solide à un effort de traction sur l'unité de surface, on aura

$$\mathrm{P}x = \frac{1}{3}\mathrm{R}av^2, \quad v^2 = 3\,\frac{\mathrm{P}}{r}\,\frac{x}{a}.$$

2°. Supposons que la charge soit distribuée uniformément sur la longueur AB du solide (*fig.* 51, *Pl. X*), soit p le poids porté par l'unité de longueur du solide; on aura

$$px\,\frac{1}{2}\,x = \frac{1}{3}\,r\,av^2, \quad v = \sqrt{\frac{3p}{2ar}}\,x.$$

On résout facilement les mêmes questions dans le cas où les sections

transversales du solide sont toutes des cercles ayant leurs centres sur une même droite horizontale ; quand ces sections sont des rectangles semblables ; quand la loi de leurs largeurs ou hauteurs est donnée, etc.

Quand le solide, qui doit être d'égale résistance à la rupture, est posé sur deux appuis, et qu'il est chargé, soit en son milieu par un poids unique, soit par des poids distribués uniformément sur sa longueur, soit uniquement par son propre poids, il est aisé d'en déterminer la figure au moyen des solutions précédentes, et de la détermination des moments d'inertie que nous donnons ci-dessous.

DÉTERMINATION DES MOMENTS D'INERTIE DE DIVERSES SUBSTANCES PLANES, ET APPLICATIONS A LA RÉSISTANCE DES SOLIDES PRISMATIQUES ENCASTRÉS.

Expression de $S v^2 d\omega$, ou du moment d'inertie pour des pièces de différentes formes. — Si la section du solide est un rectangle (*fig.* 52, *Pl. X*) dont l'un des côtés a est perpendiculaire à la direction de la force P, tandis que l'autre b est parallèle à cette direction, on aura

$$d\omega = a dv, \quad \text{et, par suite,} \quad I = a \mathrm{S}_{-\frac{1}{2}b}^{\frac{1}{2}b} v^2 dv = \frac{av^3}{3} + c.$$

Pour $v = \frac{1}{2} b$, on a

$$I_1 = \frac{ab^3}{24} + c;$$

pour $v = -\frac{1}{2} b$, on a

$$-I_2 = -\frac{ab^3}{24} + c;$$

et, en retranchant la seconde équation de la première, on a

$$I_1 + I_2 = I = \frac{ab^3}{24}, \quad 12$$

d'où l'on obtiendra, en observant que $v' = \frac{1}{2} b$,

$$\frac{\mathrm{RI}}{v'} = \frac{\mathrm{R}ab^2}{6} \quad \text{et} \quad \mathcal{E} = \mathrm{EI} = \frac{\mathrm{E}ab^3}{12},$$

et, par suite,

$$\mathrm{P}l = \frac{\mathrm{R}ab^2}{6} \quad \text{et} \quad \mathrm{P}l^3 = \frac{\mathrm{E}ab^3}{12} f.$$

Lorsque le solide (*fig.* 53, *Pl. X*) est évidé, le moment d'inertie de sa section est la différence entre le moment d'inertie du rectangle extérieur et celui du rectangle intérieur, et l'on a

$$I = \frac{ab^3 - a'b'^3}{12},$$

d'où

$$\mathrm{P}l = \mathrm{R}\left(\frac{ab^3 - a'b'^3}{6b}\right) \quad \text{et} \quad \mathrm{P}l^3 = \frac{\mathrm{E}}{12}(ab^3 - a'b'^3) f.$$

Cette formule ne serait pas applicable si les faces latérales du solide

étaient très-minces et pouvaient se voiler. On diminue cet effet en plaçant des congés dans les angles creux.

Si, au lieu d'un solide évidé au milieu, on a un prisme évidé latéralement (*fig.* 54, *Pl. X*), le moment d'inertie sera égal au moment d'inertie du rectangle plein, ayant pour dimensions a et b, diminué de deux fois le moment d'inertie du rectangle, ayant pour largeur a' et pour hauteur b'. On aura

$$I = \frac{1}{12}(ab^3 - 2a'b'^3)$$

si la section du solide est un parallélogramme, et si l'axe d'inertie est perpendiculaire à la direction de la force qui tend à infléchir le corps par deux arêtes opposées du prisme, comme dans la *fig.* 55, *Pl. X*, on aura

$$I = Sv^2 d\omega = Sv^2 a\left(\frac{h-v}{h}\right)dv,$$

parce que $d\omega = opdv$, et que $op : mn = a :: qr = h - v : h$; d'où

$$op = a\left(\frac{h-v}{h}\right).$$

En effectuant l'intégrale, il vient

$$S_{-h}^{h}\frac{a}{h}(h-v)v^2 dv = \frac{a}{h}\left(\frac{hv^3}{3} - \frac{v^4}{4}\right) + C = \frac{1}{6}ah^3,$$

et, par suite,

$$Pl = \frac{R}{6}ah^2 \quad \text{et} \quad Pl^3 = \frac{E}{6}ah^3 f.$$

Si la section du solide (*fig.* 56, *Pl. X*) était un triangle abc, dont l'axe d'inertie serait placé comme ad, le moment d'inertie serait moitié de celui du parallélogramme entier $baca'$, et en appelant α la demi-diagonale ad, on aurait

$$I = \frac{1}{12}\alpha h^3, \quad \text{d'où} \quad Pl = \frac{R}{12}\alpha h^2 \quad \text{et} \quad Pl^3 = E\frac{\alpha h^3}{12}f.$$

Quand l'axe d'inertie (*fig.* 57, *Pl. X*) est parallèle à l'un des côtés, à ab par exemple, on commence par prendre le moment d'inertie par rapport au côté ab, lequel a été trouvé, dans le cas du parallélogramme, $\frac{1}{12}ah^3$, puis on déduit de cette expression le produit de la surface du triangle par le carré de la distance de l'axe hypothétique au centre de gravité, distance qui, dans le cas actuel, est égale au $\frac{1}{3}$ de la hauteur h; on a ainsi

$$I = \frac{1}{12}ah^3 - \frac{ah}{2} \times \left(\frac{h}{3}\right)^2 = \frac{1}{36}ah^3,$$

d'où

$$Pl = \frac{R}{36}ah^2 \quad \text{et} \quad Pl^3 = \frac{E}{36}ah^3 f,$$

pour obtenir le moment d'inertie d'un rectangle ABCD (*fig.* 58, *Pl. X*)

placé dans une position telle, que l'axe d'inertie fasse un angle α avec le côté AC et passe en dehors des angles A et D du rectangle.

Le moment d'inertie du trapèze KCDL sera égal au moment d'inertie du triangle KCO, diminué du moment d'inertie du triangle LDO. Soient $AC = a$, $CD = b$, $CE = h$; le moment d'inertie du triangle KCO aura pour expression la moitié du moment d'inertie du parallélogramme formé sur KCO ou $\frac{1}{12}\,\mathrm{KO}\,h^3 = \frac{1}{6} \times \frac{\mathrm{KO}}{2} \times h \times h^2$; mais $\frac{\mathrm{KO}}{2} \times h$ est la surface du triangle KCO, que nous appellerons T, et nous aurons ainsi $\frac{1}{6}\,\mathrm{T}h^2$.

Si nous nommons T' la surface du triangle LDO, son moment d'inertie sera $\frac{1}{6}\,\mathrm{T}'h'^2$, et celui du trapèze KCDL deviendra

$$(1) \qquad \frac{1}{6}(\mathrm{T}h^2 - \mathrm{T}'h'^2).$$

Mais les deux triangles considérés étant semblables, sont entre eux comme les carrés de leurs hauteurs : ainsi

$$\mathrm{T} : \mathrm{T}' :: h^2 : h'^2, \quad \text{d'où} \quad \mathrm{T}h'^2 = \mathrm{T}'h^2;$$

de sorte que nous pourrons ajouter à l'expression (1) $\mathrm{T}h'^2$ et en retrancher $\mathrm{T}'h^2$, sans en changer la valeur; ainsi l'expression (1) deviendra

$$\frac{1}{6}(\mathrm{T}h^2 + \mathrm{T}h'^2 - \mathrm{T}'h'^2 - \mathrm{T}'h^2) = \frac{1}{6}(\mathrm{T} - \mathrm{T}')(h^2 + h'^2).$$

Pour faire disparaître h et h', j'observe qu'en menant par le point H, milieu de AC, HG parallèle à KO,

$$h = \mathrm{GE} + \mathrm{CG} = \frac{a}{2}\sin\alpha + \frac{b}{2}\cos\alpha :$$

de même, en menant MI parallèle à KO, on a

$$\mathrm{DF} = h' = \mathrm{DI} - \mathrm{FI} = \frac{a}{2}\sin\alpha - \frac{b}{2}\cos\alpha;$$

donc

$$h^2 + h'^2 = \frac{1}{2}(a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha),$$

et, par suite, le moment d'inertie du trapèze KCDE sera

$$\frac{1}{2}(\mathrm{T} - \mathrm{T}')(a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha).$$

Mais $\mathrm{T} - \mathrm{T}' = \frac{ab}{2}$; ainsi le moment d'inertie total, double de celui du trapèze KCDL, sera

$$\mathrm{I} = \frac{ab}{12}(a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha).$$

Multipliant par R et divisant par $h = \frac{1}{2}(a\sin\alpha + b\cos\alpha)$, pour

avoir le moment de résistance $\frac{RI}{v'}$, il viendra

$$Pl = \frac{Rab}{6}\left(\frac{a^2 \sin^2\alpha + b^2 \cos^2\alpha}{a \sin\alpha + b \cos\alpha}\right).$$

Si $\alpha = 0$, $\sin\alpha = 0$, $\cos\alpha = 1$, et l'on obtient

$$Pl = \frac{Rab \times b^2}{6b} = \frac{Rab^2}{6b}.$$

Si la section est un cercle d'un rayon r (*fig.* 59, *Pl. X*), nous prendrons pour l'élément $d\omega$ une portion de la surface comprise entre deux cercles et deux rayons infiniment voisins et ayant pour abscisse u et pour ordonnée v. Par suite de la forme régulière du cercle, on pourra prendre soit OU, soit OV pour axe du moment d'inertie, et l'on aura toujours le même résultat. Ainsi

$$Svd\omega = Sud\omega \quad \text{et} \quad Sv^2 d\omega = \frac{1}{2} S(u^2 + v^2)\, d\omega;$$

mais

$$u^2 + v^2 = z^2 \quad \text{et} \quad d\omega = zd\varphi dz,$$

$zd\varphi$ étant la différentielle de l'arc de cercle passant par le point m, à l'extrémité du rayon r: ainsi on aura

$$I = \frac{1}{2} Sz^3 d\varphi dz.$$

Intégrant par rapport à φ et remarquant que $Sd\varphi = 2\Pi$, il viendra

$$I = \Pi S z^3 dz,$$

d'où, en intégrant depuis 0 jusqu'à r, on obtient

$$I = \Pi S_r^0 z^3 dz = \Pi \frac{r^4}{4},$$

et, par conséquent,

$$\frac{RI}{v'} = Pl = \frac{R\Pi r^3}{4} \qquad \text{et} \qquad Pl^3 = \frac{Er^4}{4} f.$$

Si le cylindre est creux, on prend l'intégrale depuis $z = r$ jusqu'à $z = r'$ et l'on a

$$I = \frac{\Pi}{4}(r'^4 - r^4).$$

DE LA RÉSISTANCE A UNE PETITE TORSION.

La théorie de ce genre de résistance est fondée sur des considérations analogues à celles qui ont été employées pour la résistance à la flexion.

Soit un solide prismatique encastré horizontalement à l'une de ses extrémités (*fig.* 60, *Pl. X*). Supposons qu'un poids P agisse à l'autre extrémité avec le bras du levier BC pour tordre le solide autour de son axe; imaginons que, par l'effet de la torsion, un diamètre bb de la section extrême, sur laquelle agit le poids P, se soit transporté en $b'b'$. Le diamètre correspondant AA de l'extrémité encastrée n'aura éprouvé aucun déplacement, et l'on peut concevoir que tous les diamètres des sections intermédiaires, tels que dd, se sont déplacés proportionnel-

lement à leur distance Ad de l'extrémité encastrée. Par l'effet de ces déplacements, les molécules qui, dans deux sections transversales consécutives, étaient, avant la torsion, vis-à-vis les unes des autres, ont été éloignées d'une quantité proportionnelle : 1° à leur distance de l'axe du solide; 2° à la différence des angles parcourus par chaque diamètre dans deux sections transversales consécutives, différence qui est proportionnelle à l'angle bCb' et réciproque à la longueur Ab du solide. On peut supposer, la torsion étant censée très-petite, que les résistances naissant des déplacements sont proportionnelles à ces déplacements. Le moment de la résistance qui a lieu dans une section quelconque du solide doit d'ailleurs être égal au moment du poids P.

Ainsi, considérant la section transversale $aba'b'$ (*fig.* 61, *Pl. X*), où C est le centre autour duquel la torsion s'opère, et désignant par c la longueur du solide, depuis l'extrémité encastrée jusqu'à celle où agit le poids P; par φ l'angle mCa que forme le rayon vecteur Cm d'un point quelconque de la section avec la figure horizontale aa'; par ρ la longueur Cm de ce rayon vecteur; on aura $\rho = f(\varphi)$ pour l'équation de la courbe $aba'b'$, qui est le contour de la section.

Soient θ l'angle mCm' décrit par la section extrême du solide, par l'effet de la torsion, lequel est supposé fort petit;

t un poids constant pour chaque espèce de corps et représentant sa résistance spécifique à la torsion;

R le bras du levier BC avec lequel le poids P agit pour produire la torsion; on aura

$$t \times \frac{\theta}{c} d\varphi \times d\rho \times \rho^2$$

pour la résistance provenant de la torsion.

Si la section transversale des solides est un cercle dont le rayon est r, on a

$$f(\varphi) = r,$$

et la formule générale ci-dessus devient

$$\text{PR} = \frac{t\theta}{c} \times 2\Pi \times \frac{1}{4} r^4.$$

Pour le cas où cette section transversale est un rectangle, on doit chercher à part l'expression de la résistance à la torsion de l'un des huit triangles égaux, tels que acb, dont cette section se compose (*fig.* 62, *Pl. X*). L'équation de la ligne ab qui termine ce triangle est, en nommant a la largeur aa' du rectangle,

$$\rho = \frac{1}{2} a \times \frac{1}{\cos\varphi},$$

et le moment de la résistance du triangle acb à la torsion est exprimé par

$$\frac{t\theta}{c} \times \frac{a^4}{4 \times 16} \left(\frac{1}{3} \frac{\sin\varphi}{\cos^2\varphi} + \frac{2}{3} \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}\right),$$

formule où il faut faire l'angle φ égal à acb; en la multipliant par 8, on aura le moment total de la résistance du rectangle.

Si le rectangle devient un carré, $\sin acb = \cos acb = \frac{1}{\sqrt{2}}$, et l'expression du moment de la résistance à la torsion est

$$PR = \frac{t\theta}{c} \times \frac{1}{6} a^4.$$

Pour le cercle qui serait inscrit dans ce carré, le moment de la résistance à la torsion serait $\frac{t\theta}{c} \times \frac{\Pi}{32} a^4$. Il est donc plus petit dans le rapport de $\frac{\Pi}{32}$ à $\frac{1}{6}$.

DE L'ÉQUILIBRE DES MASSIFS FORMÉS DE MATIÈRES ADHÉRENTES.

Les massifs que l'on a à considérer dans les constructions sont formés par des terres, des sables, des maçonneries. Pour établir les lois de leur équilibre, on les considérera en premier lieu comme des masses homogènes dont les parties adhèrent les unes aux autres et n'ont pas plus de tendance à se séparer dans un diamètre que dans un autre. On examinera ensuite ce qui doit arriver, quand les massifs sont formés de matériaux taillés régulièrement et posés par assises.

Considérons une masse homogène abandonnée à l'action de la pesanteur; on peut avoir à rechercher les conditions de son équilibre dans deux circonstances différentes :

1°. Quand cette masse, d'une épaisseur indéfinie, a été coupée latéralement sur une certaine hauteur;

2°. Quand elle est terminée par deux faces latérales, entre lesquelles elle n'a qu'une faible épaisseur, ce qui est le cas d'une levée en terre ou d'un mur.

Soit en premier lieu, une masse homogène d'une épaisseur indéfinie ABDC (*fig.* 63, *Pl. X*) terminée en dessus par un plan horizontal CD, laquelle aurait été coupée latéralement sur une certaine hauteur, suivant le plan AC. Il s'agit de reconnaître si cette masse est en équilibre, et quelle doit être l'inclinaison du plan AC pour que l'action de la pesanteur ne produise le détachement et l'ébranlement d'aucune partie de la masse.

Cette recherche se fonde sur le principe suivant : Supposons une ligne quelconque telle que *at*, qui sépare de la masse une portion C*at*; on considère cette portion séparée comme un corps solide que la pesanteur tend à faire glisser le long de *at* et qui est retenu par l'effet de la cohésion et du frottement. Si, parmi les diverses directions qu'on peut donner à *at*, on distingue celle qui est le plus favorable au glissement de C*at*, et qu'on établisse que le glissement ne peut avoir lieu dans ce cas, on sera certain qu'il ne peut avoir lieu, à plus forte raison, dans toute autre direction de *at*, et, par conséquent, que la masse se tiendra en équilibre.

La direction de *at* qui est considérée comme la plus favorable au glissement de C*at*, est celle où les forces qui tendent à produire le glissement, sont les plus grandes possibles par rapport aux forces qui tendent à l'empêcher.

Pour simplifier les solutions, on ne suppose pas à la ligne de séparation at une figure indéterminée. On suppose d'avance que cette ligne est droite, en sorte que l'on a seulement à faire varier la position d'un de ses points a et son inclinaison. Cette supposition s'éloigne très-peu des effets naturels, tels que l'observation les fait connaître.

D'après ces considérations, et en désignant par

h la hauteur ae de l'extrémité inférieure de la ligne de séparation,

H la hauteur AE de la coupure faite dans le massif,

m le rapport de la base à la hauteur du talus AC ou tangente de l'angle EAC,

b angle Cat que la ligne de séparation fait avec la verticale,

π le poids de l'unité de volume de la matière du massif,

γ l'effort rapporté à l'unité carrée qu'il faut employer pour séparer deux portions en contact du massif, en les faisant glisser l'une sur l'autre,

f le rapport du frottement à la pression pour deux portions du massif, glissant l'une sur l'autre; on aura :

Poids du triangle,

$$Cat = \frac{1}{2}\pi h^2 (\operatorname{tang} b - m),$$

force qui tend à le faire glisser le long de

$$at = \frac{1}{2}\pi h^2 (\operatorname{tang} b - m)\cos b,$$

force qui s'oppose à ce glissement,

$$f \times \frac{1}{2}\pi h^2 (\operatorname{tang} b - m)\sin b + \gamma\frac{h}{\cos b}.$$

La force qui tend à opérer le glissement sera la plus grande possible par rapport à celle qui tend à l'empêcher, quand le rapport

$$\frac{\pi h(\operatorname{tang} b - m)}{f\pi h(\operatorname{tang} b - m)\operatorname{tang} b + 2\gamma(1 + \operatorname{tang}^2 b)}$$

sera un maximum.

Il faut déterminer h et b d'après cette condition. A l'égard de h, le rapport augmente indéfiniment avec cette quantité. On doit donc lui donner la plus grande valeur possible, c'est-à-dire faire $h = H$, ou placer le point a en A. Si l'on différentie ensuite par rapport à b et qu'on égale la différentielle à zéro, on trouve

$$\operatorname{tang}^2 b - 2m \operatorname{tang} b + \frac{f\pi H m^2 - 2\gamma}{f\pi H + 2\gamma} = 0,$$

d'où

$$(4) \qquad \operatorname{tang} b = m + \sqrt{\frac{2\gamma(1 + m^2)}{f\pi H + 2\gamma}},$$

ce qui détermine l'inclinaison de la ligne AT par la condition que le prisme CAT ait la plus grande tendance possible à se détacher du reste de la masse.

Si γ est très-grand, cette expression se réduit à

$$\operatorname{tang} b = m + \sqrt{1 + m^2},$$

ce qui fixe l'angle le plus grand que la ligne de séparation puisse faire avec la verticale (cet angle est demi-droit si la coupure AC est verticale); à mesure que γ diminue, b diminue également, et si $\gamma = 0$, ou si les terres n'ont aucune cohésion, le prisme qui a le plus de tendance à se séparer, est le prisme infiniment mince contigu à AC.

La condition que le massif est en équilibre s'écrit en égalant les expressions des forces qui tendent à faire glisser le prisme ACT, et qui s'opposent à son glissement, et en mettant dans l'équation, pour tang b, la valeur qui vient d'être trouvée; on a ainsi

$$(5)\quad \left\{ \begin{array}{l} (f^2\pi^2 h^2 - 4f\gamma\pi\mathrm{H} - 12\gamma^2)\, m^2 - 2\pi\mathrm{H}(f\pi\mathrm{H} + 2\gamma)\, m \\ \quad + \pi^2\mathrm{H}^2 - 8f\pi\gamma\mathrm{H} - 16\gamma^2 = 0, \end{array} \right.$$

équation qui, étant donnée la hauteur H de la coupure, fixera l'inclinaison du talus AC, suivant lequel cette coupure doit être faite, pour qu'il ne survienne pas d'éboulement; quand $\gamma = 0$, l'équation (5) se réduit à

$$f^2m^2 - 2fm + 1 = 0, \quad \text{d'où} \quad m = \frac{1}{f},$$

ce qui signifie que les terres doivent être coupées suivant un angle tel, que le glissement ne puisse avoir lieu en vertu du seul frottement, résultat facile à prévoir.

Quand $m = 0$, l'équation (5) devient

$$\pi^2\mathrm{H}^2 - 8f\pi\gamma\mathrm{H} - 16\gamma^2 = 0, \quad \text{d'où} \quad \mathrm{H} = 4\left(f \pm \sqrt{1+f^2}\right)\frac{\gamma}{\pi},$$

et enfin

$$(6)\qquad \gamma = \frac{\pi\mathrm{H}}{4\left(f + \sqrt{1+f^2}\right)}.$$

La valeur de H est l'expression de la plus grande hauteur sur laquelle la masse puisse être coupée verticalement, sans qu'il survienne d'éboulement. Si $\gamma = 0$, cette hauteur est nulle.

La valeur du nombre f est toujours facile à connaître, en observant le talus que prend la matière du massif quand sa cohésion a été rompue. f est la tangente de l'angle que le plan de ce talus forme avec l'horizon. En observant la hauteur sur laquelle le massif peut être coupé verticalement sans qu'il y ait éboulement, on connaîtra le poids γ au moyen de l'équation précédente.

Supposons maintenant que la surface supérieure CD (*fig.* 64, *Pl. X*) du massif soit chargée uniformément par des matières susceptibles de se diviser suivant des plans verticaux correspondants aux extrémités supérieures T des lignes de rupture AT du massif; nommant Q la pression qui en résulte sur l'unité de surface du plan CD, on aura :

Pour la force qui tend à opérer le glissement le long de AT,

$$(7)\qquad \left(\mathrm{QH} + \frac{1}{2}\pi\mathrm{H}^2\right)(\operatorname{tang} b - m)\cos b\,;$$

Pour celle qui tend à l'empêcher,

$$(8)\qquad f\left(\mathrm{QH} + \frac{1}{2}\pi\mathrm{H}^2\right)(\operatorname{tang} b - m)\sin b + \gamma\frac{\mathrm{H}}{\cos b}\,;$$

Pour l'inclinaison de AT la plus favorable au glissement,

$$(9) \qquad \operatorname{tang} b = m + \sqrt{\frac{2\gamma(1+m^2)}{f(2Q+\pi H)+2\gamma}}.$$

On formera une équation d'équilibre correspondante à l'équation (5), en égalant les expressions des forces qui tendent à opérer et à empêcher le glissement, et en mettant dans cette équation, à la place de tang b, la valeur précédente.

Si l'épaisseur de la masse dans laquelle la coupure est faite n'est pas indéfinie, et si cette masse est contenue entre deux plans suffisamment rapprochés l'un de l'autre, il pourra se faire que la ligne de rupture AT déterminée d'après ce qui précède, au lieu d'aboutir à la face supérieure du massif, aille rencontrer la face latérale opposée à AC (*fig.* 65, *Pl. X*) : alors la solution précédente ne convient plus, et il faut établir un autre calcul, comme il suit :

Soient h la hauteur de aE de l'extrémité inférieure de la ligne de séparation at, H la hauteur totale du massif, a l'épaisseur CD du massif au sommet, A l'épaisseur AB de ce massif à sa base, m la tangente de l'angle du talus AC avec la verticale, n la tangente de l'angle du talus BD avec la verticale, α l'inclinaison sur l'horizontale aG de la ligne de rupture at; π, f, Q ayant les mêmes significations que ci-dessus, nous aurons

$$aG = a + (m+n)h, \quad Ft = [a + (m+n)h]\frac{\operatorname{tang}\alpha}{1 + n\operatorname{tang}a},$$

$$at = \frac{a + (m+n)h}{(1 + n\operatorname{tang}\alpha)\cos\alpha}.$$

Pour la force qui tend à faire glisser le prisme aCDt le long de at,

$$(10)\left\{aQ + \pi ah + \frac{1}{2}\pi(m+n)h^2 - \frac{1}{2}\pi[a + (m+n)h]^2\frac{\operatorname{tang}\alpha}{1+n\operatorname{tang}\alpha}\right\}\sin\alpha;$$

Pour la force qui s'oppose à ce glissement,

$$(11) \quad \left\{\begin{aligned} & f\left\{\begin{aligned} & aQ + \pi ah + \frac{1}{2}\pi(m+n)h^2 \\ & \quad - \frac{1}{2}\pi[a + (m+n)h]^2\frac{\operatorname{tang}\alpha}{1+n\operatorname{tang}\alpha} \end{aligned}\right\}\cos\alpha \\ & \quad + \gamma\frac{a + (m+n)h}{(1+n\operatorname{tang}\alpha)\cos\alpha}. \end{aligned}\right.$$

Les valeurs de h et α d'après lesquelles l'équilibre du massif devra être établi, devront être celles qui rendent la première de ces deux forces la plus grande possible par rapport à la seconde ; à l'égard de h, cette condition se remplira en prenant cette quantité la plus grande possible, c'est-à-dire = H ; alors si l'on fait, pour abréger,

$$L = aQ + \pi aH + \frac{1}{2}\pi(m+n)H^2,$$

$$-M = naQ\frac{1}{2}\pi(a^2 + 2maH + (m+n)h^2]mH^2,$$

le rapport des deux forces devient

$$\frac{(\mathrm{L}-\mathrm{M}\tang\alpha)\tang\alpha}{f(\mathrm{L}-\mathrm{M}\tang\alpha)+\gamma\mathrm{A}(1+\tang^2\alpha)}.$$

Il reste à déterminer α de manière à rendre cette quantité un maximum.

Différentiant par rapport à α et égalant à zéro, on a

$$(fm^2-\gamma\mathrm{LA})\tang^2\alpha-2(f\mathrm{LM}+\gamma\mathrm{MA})\tang\alpha+f\mathrm{L}^2+\gamma\mathrm{LA}=0,$$

d'où

$$(12)\ \tang\alpha=\frac{f\mathrm{LM}+\gamma\mathrm{MA}}{f\mathrm{M}^2+\gamma\mathrm{LA}}+\sqrt{+\frac{f\mathrm{L}^2+\gamma\mathrm{LA}}{f\mathrm{M}^2-\gamma\mathrm{LA}}+\left(\frac{f\mathrm{LM}+\gamma\mathrm{MA}}{f\mathrm{M}^2-\gamma\mathrm{LA}}\right)^2}.$$

Ce qui détermine l'inclinaison de la ligne de séparation supposée partir du point A, par la condition que la séparation ait plus de tendance à se faire suivant cette ligne que suivant toute autre; si l'adhérence γ est extrêmement grande, cette valeur se réduit à

$$\tang\alpha=-\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{L}}+\sqrt{1+\frac{\mathrm{M}^2}{\mathrm{L}^2}}.$$

C'est la plus petite valeur que puisse avoir l'angle α. A mesure que γ diminue, α augmente, et la ligne de séparation AT se relève (*fig.* 66, *Pl. X*); mais si la formule précédente indiquait par cette ligne une direction qui fût au-dessus de AD, c'est-à-dire si l'on trouvait $\tang\alpha$ plus grand que $\frac{\mathrm{H}}{a+nh}$, la présente solution ne conviendrait plus, et il faudrait recourir aux premières équations.

La valeur de α donnée par la formule précédente étant supposée plus petite que l'angle BAD, on substituera cette valeur dans l'équation d'équilibre qui se forme en égalant les deux termes du rapport précédent, et qui est

$$(13)\quad (\mathrm{L}-\mathrm{M}\tang\alpha)(\tang\alpha-f)-\gamma\mathrm{A}(1+\tang^2\alpha)=0.$$

En se donnant trois des quatre quantités H, a, m, n, dont dépend la figure du massif, la valeur de la quatrième qui sera déduite de cette équation, indiquera une limite dont on ne pourra s'écarter sans mettre le massif au-dessus ou au-dessous de l'équilibre.

Cas particulier. — Un cas particulier qui mérite d'être considéré est celui où les deux plans AC, BD sont verticaux; on a alors

$$m=0,\quad n=0,\quad \mathrm{L}=a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H}-\mathrm{M}=-\frac{1}{2}\pi a^2;\quad \mathrm{A}=a.$$

La valeur de $\tang\alpha$ qui répond à la ligne de séparation est

$$\tang\alpha=\frac{1}{2}\frac{f(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})\pi a+\gamma\pi a^2}{\frac{1}{4}f\pi^2a^2-\gamma(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})}$$
$$+\sqrt{-\frac{f(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})^2+\gamma(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})a}{\frac{1}{4}f\pi^2a^2-\gamma(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})a}+\frac{1}{4}\left(\frac{f(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})\pi a+\gamma\pi a^2}{\frac{1}{4}f\pi^2a^2-\gamma(a\mathrm{Q}+\pi a\mathrm{H})}\right)^2}.$$

Lorsque l'adhérence est extrêmement grande, cette valeur se réduit à

$$(14)\quad \tang\alpha=-\frac{\pi a}{2(\mathrm{Q}+\pi\mathrm{H})}+\sqrt{1+\frac{\pi^2a^2}{4(\mathrm{Q}+\pi\mathrm{H})^2}}.$$

Ce qui montre que l'inclinaison de la ligne de séparation est toujours alors plus petite que $\frac{1}{2}$ angle droit ; mais on approche beaucoup si a est petit par rapport à H et si Q est grand.

L'équation d'équilibre est

$$(15)\ \left(Q + \pi H - \frac{1}{2}\pi a \operatorname{tang}\alpha\right)(\operatorname{tang}\alpha - f) - \gamma(1 + \operatorname{tang}^2\alpha) = 0,$$

où il faut mettre pour tang α la valeur donnée par la formule précédente.

Les valeurs de H ou de a qui s'en déduiront seront la plus grande hauteur ou la plus petite épaisseur qui se puisse donner au massif, pour qu'il se tienne en équilibre.

Supposons encore la charge placée sur le massif extrêmement considérable par rapport au poids de la portion du massif qui doit glisser, si l'équilibre est rompu ; on fera alors $\pi = 0$ et la valeur de tang α deviendra

$$\operatorname{tang}\alpha = \sqrt{\frac{fQ + \gamma}{\gamma}}.$$

En négligeant la considération du frottement, et qu'on fasse $f = 0$, il viendra tang $\alpha = 1$. La ligne de séparation sera inclinée de $\frac{1}{2}$ angle droit, comme nous l'avons déjà trouvé ci-dessus.

Les résultats donnés précédemment sont fondés sur l'hypothèse de l'homogénéité de la matière du massif ; on peut les appliquer aux masses de terres ou de sables, aux massifs de maçonnerie faits en béton ou en petits moellons posés irrégulièrement et unis par du mortier.

Équilibre des massifs de maçonnerie faits en pierres posées régulièrement à joints recouverts et par assises horizontales.

Si nous appliquons à ce cas les formules précédentes, et si nous mettons dans ces formules pour f et γ les valeurs qui conviennent à la matière des mortiers qui unit les pierres, elles indiqueront que le massif est susceptible de se disjoindre suivant une direction AT (*fig.* 67, *Pl. X*), plutôt que suivant toute autre, et ce sera, en supposant effectivement la séparation faite, dans cette direction qu'il faudra établir l'équilibre. Mais si une telle disjonction s'opérait dans un massif construit comme on le suppose ici, la surface de rupture serait formée par une suite de plans alternativement horizontaux et verticaux, et tout glissement serait impossible, à moins que les parties des pierres engagées les unes dans les autres ne se rompent. L'effet de cette construction est donc qu'il ne peut s'opérer de disjonction dans le massif sans que les pierres ne soient rompues tout le long de la surface de séparation ; et par suite on doit mettre dans les formules pour f et γ non pas les valeurs qui conviennent à la matière du mortier, mais celles qui conviennent à la matière des pierres. Ces dernières valeurs étant beaucoup plus grandes que les premières, on pourra augmenter la charge du massif ou diminuer son épaisseur. C'est d'après ces considérations qu'on apprécie exactement l'excédant de solidité qu'on ob-

tient en construisant un mur en pierres un peu grandes, appareillées avec soin et régularité.

Équilibre des massifs de maçonnerie dans le cas où le mur est soumis à un effort exercé latéralement contre une de ses faces.

Pour ne pas être conduit à des formules trop compliquées, on considérera seulement le cas où les faces opposées du massif sont verticales.

ABCD (*fig.* 68, *Pl. X*) étant la section transversale du massif, une force quelconque appliquée en E tend à produire dans ce massif une disjonction qui peut s'opérer de deux manières :

1°. La partie supérieure, après avoir été séparée, peut glisser sur le plan de séparation;

2°. Cette partie peut s'écarter du plan de séparation, tourner sur son arête inférieure et être renversée.

La résistance à ces deux modes de rupture dépendant de qualités spécifiques différentes dans la matière du massif, nous les considérerons séparément; nous commencerons par la rupture qui peut s'opérer par glissement.

Soient a l'épaisseur AB du mur; h la hauteur BE depuis la base jusqu'au point d'application de l'effort exercé latéralement; P l'effort horizontal exercé en E; Q l'effort vertical exercé en ce point, plus le poids de la partie CDEF du mur; α l'angle BAT formé par la ligne de séparation AT avec l'horizon; π, f, γ ayant la même signification que dans ce qui précède.

Remarquons : 1° que le mur étant supposé en équilibre par lui-même, l'effort latéral ne peut occasionner de disjonction que suivant une ligne tracée dans l'espace ABEF; 2° qu'à inclinaison égale de la ligne de séparation, cette séparation sera d'autant plus facile que cette ligne sera située plus bas, en sorte qu'il faut la supposer tracée du point A; on aura, pour la force qui tend à opérer le glissement suivant AT,

$$(1) \qquad P\cos\alpha + \left(Q + \pi a h - \frac{1}{2}\pi a^2 \operatorname{tang}\alpha\right)\sin\alpha;$$

Pour la force qui s'oppose à ce glissement,

$$(2)\ f\left[-P\sin\alpha + \left(Q + \pi a h - \frac{1}{2}\pi a^2 \operatorname{tang}\alpha\right)\cos\alpha\right] + \gamma\frac{a}{\cos\alpha}.$$

Le rapport de ces deux forces en faisant, pour abréger, $Q' = Q + \pi a h$

$$\frac{P + (Q' - \frac{1}{2}\pi a^2 \operatorname{tang}\alpha)\operatorname{tang}\alpha}{-fP\operatorname{tang}\alpha + f(Q' - \frac{1}{2}\pi a^2\operatorname{tang}\alpha) + \gamma . a(1 + \operatorname{tang}^2\alpha)}.$$

Il faut déterminer α par la condition que ce rapport doit être un maximum; on trouve pour cela l'équation

$$\left(\frac{1}{2}f\pi P a^2 - \frac{1}{4}f\pi^2 a^4 + \gamma Q' a\right)\operatorname{tang}^2\alpha + (f\pi Q' a^2 + \pi\gamma a^3 + 2\gamma P a)\operatorname{tang}\alpha - f(P^2 + Q'^2) - \frac{1}{2}f\pi P a^2 - \gamma Q' a = 0,$$

d'où

$$\tang\alpha = -\frac{1}{2}\left(\frac{f\mathrm{P}\mathrm{Q}'a + \pi\gamma a^2 + 2\gamma\mathrm{P}}{\frac{1}{2}f\pi\mathrm{P}a - \frac{1}{4}f\pi^2a^3 + \gamma\mathrm{Q}'}\right)$$
$$+\sqrt{\frac{f(\mathrm{P}^2 + \mathrm{Q}'^2) + \frac{1}{2}f\pi\mathrm{P}a^2 + \gamma\mathrm{Q}'a}{\frac{1}{2}f\pi\mathrm{P}a^2 - \frac{1}{4}f\pi^2a^4 + \gamma\mathrm{Q}'a} + \frac{1}{4}\left(\frac{f\pi\mathrm{Q}'a + \pi\gamma a^2 - 2\gamma\mathrm{P}}{\frac{1}{2}f\pi\mathrm{P}a - \frac{1}{4}f\pi^2a^3 + \gamma\mathrm{Q}'}\right)^2},$$

pour la détermination de l'angle α qui fixera la position de AT suivant laquelle le glissement a le plus de tendance à s'opérer.

En supposant l'adhérence γ extrêmement grande, cette formule devient

$$(3)\qquad \tang\alpha = -\frac{1}{2}\,\frac{\pi a^2 + 2\mathrm{P}}{\mathrm{Q}'} + \sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\pi a^2 + 2\mathrm{P}}{\mathrm{Q}'}\right)^2}.$$

C'est la plus petite valeur que puisse avoir l'angle α; elle est toujours au-dessous de $\frac{1}{2}$ angle droit. Quand l'adhérence diminue, la ligne de séparation s'élève; mais quand cette ligne a atteint la situation AE, on ne peut pas admettre des valeurs plus grandes pour $\tang\alpha$, et l'on doit supposer $\tang\alpha = \frac{h}{a}$, lors même que la formule précédente donnerait pour cette quantité des valeurs plus grandes.

L'équation qui exprime l'équilibre du système est

$$\mathrm{P}(1 + f\tang\alpha) + \left(\mathrm{Q}' - \frac{1}{2}\pi a^2\tang\alpha\right)(\tang\alpha - f)$$
$$- \gamma a(1 + \tang^2\alpha) = 0,$$

où il faut mettre pour $\tang\alpha$ la valeur donnée par la formule (3), si cette valeur est plus petite que $\frac{h}{a}$, et où l'on doit faire $\tang\alpha = \frac{h}{a}$; dans le cas contraire, les dimensions du mur devront être telles, que la somme des termes négatifs soit au moins égale à celle des termes positifs.

Remarque. — Si le mur reposait sur une base d'une autre matière, de manière que pour la surface AB les constantes f et γ eussent des valeurs particulières f' et γ', moindres que pour d'autres surfaces de séparation prises dans l'intérieur du mur, il faudrait vérifier si cette autre équation d'équilibre $\mathrm{P} - f'\mathrm{Q}' - \gamma' a = 0$ est satisfaite.

Cas où le mur peut s'écarter du plan de séparation, tourner sur son arête inférieure et être renversé. — Soient a la largeur AB du mur; H la hauteur BE depuis la base jusqu'au point d'application de la force P; h la hauteur ED du mur, au-dessus de ce point; θ l'angle de la direction de la force P avec l'horizontale EF; π le poids de l'unité de volume de la matière du mur; r la cohésion absolue sur l'unité de surface de cette matière; on aura la perpendiculaire

$$\mathrm{AH} = (h - a\tang\theta)\cos\theta \quad (\textit{fig. } 69, \textit{Pl. X}).$$

Le moment de la force qui tend à faire tourner la partie supérieure du mur autour de l'arête A, donne

$$(1)\qquad \mathrm{P}(\mathrm{H} - a\tang\theta)\cos\theta;$$

pour le moment des forces qui s'opposent à ce renversement,

$$(2)\qquad \frac{1}{2}\pi a^2(\mathrm{H}+h)-\frac{1}{3}\pi a^3 \operatorname{tang}\alpha+\frac{1}{3}r\frac{a^2}{\cos^2\alpha};$$

le rapport de ces moments est

$$\frac{\mathrm{P}(\mathrm{H}-a\operatorname{tang}\theta)\cos\theta}{\frac{1}{2}\pi a^2(\mathrm{H}+h)-\frac{1}{3}\pi a^3\operatorname{tang}\alpha+\frac{1}{3}r\frac{a^2}{\cos^2\alpha}}.$$

Il faut déterminer α de manière qu'il soit le plus grand possible, condition exprimée par l'équation

$$-\pi a+2\operatorname{tang}\alpha=0,\quad \text{d'où}\quad \operatorname{tang}\alpha=\frac{\pi a}{2r}.$$

On voit qu'à mesure que la cohésion est plus grande, la ligne de rupture est plus près d'être horizontale et de se confondre avec AB; quand la cohésion diminue, α augmente; mais, comme nous l'avons déjà remarqué, on ne peut admettre que la ligne de rupture dépasse AE ou que $\operatorname{tang}\alpha>\frac{\mathrm{H}}{a}$.

La relation $\operatorname{tang}\alpha=\frac{\mathrm{H}}{a}$ donne $\frac{\mathrm{H}}{a}=\frac{\pi a}{2r}$, d'où $r=\frac{\pi a^2}{2\mathrm{H}}$; quand il arrivera que $r>\frac{\pi a^2}{2\mathrm{H}}$, l'équation exprimant l'équilibre du système sera

$$(3)\quad \mathrm{P}(\mathrm{H}-a\operatorname{tang}\theta)\cos\theta-\frac{1}{2}\pi a^2(\mathrm{H}+h)+\frac{1}{12}\frac{\pi^2a^4}{r}-\frac{1}{3}ra^2=0,$$

et quand $r<\frac{\pi a^2}{2\mathrm{H}}$, il faudra faire $\operatorname{tang}\alpha=\frac{\mathrm{H}}{a}$ et employer l'équation

$$(4)\quad \mathrm{P}(\mathrm{H}-a\operatorname{tang}\theta)\cos\theta-\frac{1}{2}\pi a^2\left(\frac{1}{3}\mathrm{H}+h\right)-\frac{1}{3}r(\mathrm{H}^2+a^2)=0.$$

Le mur sera en équilibre si la somme des termes négatifs est au moins égale à celle des termes positifs.

Supposant le mur construit régulièrement par assises, et cherchant à appliquer les résultats précédents, on reconnaît que la nature de cette construction n'apporte aucun changement sensible aux effets qui se produisent dans le genre de rupture qui vient d'être considéré; en sorte qu'il ne paraît pas qu'un mur bâti par assises régulières résiste à une rupture par écartement et renversement sensiblement mieux qu'un massif homogène de même pesanteur spécifique, et où la valeur de la constante r serait la même qui convient au mortier qui est interposé entre les pierres de ce mur.

DES MASSIFS OU DES MURS D'ÉGALE RÉSISTANCE.

Un massif ou un mur est d'égale résistance quand il n'a pas plus de tendance à se disjoindre suivant une direction que suivant une autre, et quand, dans toutes les directions qu'on puisse supposer pour le plan de séparation, les forces qui tendent à produire la rupture se trouveront en équilibre avec celles qui tendent à l'empêcher.

Le mur ne pouvant se rompre que suivant des lignes telles que AT, dirigées dans l'angle BAE (*fig.* 70, *Pl. XI*), il s'agit de trouver une courbe BE suivant laquelle la face du mur au-dessous du point E serait tracée, et qui serait telle que, quelle que fût la direction de la ligne de rupture AT, la résistance du mur fût toujours en équilibre avec l'action de la force P.

Soient M le moment de la force P, pris par rapport au point A, moins le moment de la portion ACDE; H la hauteur AF du mur, depuis la base jusqu'au point d'application de la force P; C la longueur de la ligne AE; A l'angle BAE; α l'angle variable BAT; ρ la longueur de AT; α' et ρ' les valeurs de α et de ρ correspondantes au point T', π et r ayant les mêmes significations que ci-dessus (α et ρ sont les deux coordonnées auxquelles sont rapportés les points de la courbe BE).

On aura pour le moment pris par rapport au point A de l'élément triangulaire de l'aire ATE qui est placé en AT',

$$\frac{1}{3}\Pi d\alpha' \cos\alpha' . \rho'^3,$$

et pour l'équation qui exprimera l'équilibre du mur,

$$\Pi \cos\alpha\rho^3 = 2r\rho\frac{d\rho}{d\alpha}, \quad \text{d'où} \quad \frac{\Pi}{2r}\sin\alpha = \frac{1}{\rho}\times \text{constante};$$

et en observant que quand $\alpha = A$, $\rho = c$, on aura pour l'équation de la courbe cherchée,

$$\rho = \frac{2rc}{2r + \Pi(\sin A - \sin\alpha)c} \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{2rc}{2r + \Pi(H - C\sin\alpha)}.$$

Si l'adhérence r était excessivement grande, cette équation se réduirait à $\rho = c$. La courbe cherchée serait l'arc de cercle Eb décrit du point A. Quand r diminue, la courbe se modifie de manière que ρ diminue en même temps que α; lorsque $\alpha = 0$, on a

$$\rho = \frac{2rc}{2r + \Pi H},$$

ce qui est l'expression de la longueur de la base AB du mur et la plus petite des valeurs de ρ. Quand r est fort petit, cette valeur est aussi très-petite, et la courbe BE diffère très-peu de la ligne AE. Dans ce cas, qui est celui qu'on a principalement en vue dans les applications, si l'on fait le profil du mur rectangulaire, le portion AEb presque entière de la maçonnerie est inutile et ne contribue point à augmenter la résistance.

La solution précédente suppose évidemment que le mur repose sur une base avec laquelle il a une adhérence égale à celle des matières dont il est formé.

DES MURS DE REVÊTEMENT QUI SOUTIENNENT LA POUSSÉE DES TERRES OU DES EAUX.

Un massif de la nature de ceux qui ont été considérés dans ce qui précède étant coupé verticalement sur une certaine hauteur, et un mur devant être construit contre cette paroi verticale, il s'agit de rechercher quelles doivent être les dimensions de ce mur pour

qu'il s'oppose à l'éboulement du massif et ne soit point renversé ou repoussé.

Le fondement de cette recherche est dans la connaissance de la pression ou poussée qui aurait lieu en vertu des forces qui tendent à détacher et faire ébouler une partie du massif contre une paroi verticale AC (*fig.* 71, *Pl. XI*) qui s'opposerait à cet éboulement. Pour trouver la valeur de cette poussée, on emploie le même principe dont on s'est déjà servi. Supposons qu'un prisme ACt se détache du massif; regardant ce prisme comme un corps solide qui tend à glisser le long du plan incliné At, et considérant la pression exercée contre la paroi AC comme une force horizontale qui s'oppose à ce glissement, on détermine l'inclinaison de At par la condition que la valeur de cette force soit la plus grande possible. Cette valeur maximum est la pression cherchée.

Soient H la hauteur AC de la paroi verticale; b l'angle CAT; P la pression horizontale exercée contre la paroi; π, γ, f, ayant les mêmes significations que ci-dessus, on aura, pour exprimer la condition de l'équilibre du prisme CAT,

$$P\sin b = \frac{1}{2}\pi H^2 \tang b(\cos b - f\sin b) - fP\cos b - \gamma\frac{H}{\cos b};$$

d'où

$$P = \frac{-\gamma H + \frac{1}{2}\pi H^2 \tang b - (\gamma H + \frac{1}{2}f\pi H^2)\tang^2 b}{f + \tang b},$$

et, par suite,

$$\tang^2 b + 2f\tang b - 1 = 0, \quad \text{d'où} \quad \tang b = -f + \sqrt{1+f^2},$$

pour l'inclinaison de At qui rendra P un maximum.

f représente la valeur de la tangente de l'angle BAF que ferait avec l'horizon le plan du talus AF sur lequel la matière du massif se tiendrait en équilibre par l'effet du frottement seul. Soit nommé τ l'angle CAF que ce même plan fait avec la verticale, on aura

$$f = \frac{1}{\tang\tau},$$

et la valeur ci-dessus de $\tang b$ deviendra

$$\tang b = \frac{-1 + \sqrt{1 + \tang^2\tau}}{\tang\tau} = \tang\frac{1}{2}\tau.$$

Ainsi le prisme de plus grande poussée horizontale CAt est tel, que At partage en deux parties égales l'angle CAF; mettant pour $\tang b$ la valeur précédente dans l'expression de P, et remarquant que

$$f = \frac{1}{\tang\tau} = \frac{1 - \tang^2\frac{1}{2}\tau}{2\tang\frac{1}{2}\tau},$$

il vient, pour l'expression cherchée de la poussée horizontale,

$$P = H\tang\frac{1}{2}\tau\left(\frac{1}{2}\pi H\tang\frac{1}{2}\tau - 2\gamma\right);$$

si les terres n'ont aucune adhésion, $\gamma = 0$, et l'on a

$$P = \frac{1}{2}\pi H^2\tang\frac{1}{2}\tau.$$

Lorsqu'il s'agit d'un fluide, τ est un angle droit; $\operatorname{tang}\frac{1}{2}\tau = 1$, et l'on a

$$P = \frac{1}{2}\pi H^2.$$

Ayant trouvé l'expression de la poussée exercée par un massif de matières peu adhérentes contre une paroi verticale qui s'oppose à son éboulement, il est facile d'établir les conditions de l'équilibre d'un mur qui formerait cette paroi. On considère ordinairement dans les recherches de ce genre le mur comme un corps solide qui ne peut que se déplacer en entier; mais pour suivre l'esprit dans lequel les considérations précédentes ont été présentées, le mur doit être regardé comme un massif susceptible d'être rompu.

La rupture peut s'opérer soit par glissement, soit par renversement; on considérera seulement ce dernier cas, qui est celui qu'on doit avoir principalement en vue dans les applications. La marche que nous suivrons pourra d'ailleurs s'appliquer facilement à l'autre.

Soit ABCD (*fig.* 72, *Pl. XI*) la section du mur qui soutient le massif des terres et dont on suppose les parements verticaux; on remarquera que si les terres devaient s'ébouler sur la hauteur entière BD, il faudrait prendre en considération l'action contre le mur du prisme de plus grande poussée BDT déterminée comme ci-dessus. Mais alors le mur serait considéré comme ne pouvant se diviser. Si cette division peut avoir lieu, on doit considérer le mur comme pouvant être rompu suivant un plan tel que Ab, et établir l'équilibre entre la résistance qu'il opposera dans cette hypothèse et l'action du prisme de plus grande poussée bDt qui répond à la hauteur bD. On déterminera d'ailleurs la direction A b par la condition que le moment des forces qui tendent à opérer la rupture du mur et le renversement de la partie supérieure, soit le plus grand possible par rapport au moment des forces qui s'y opposent.

Cela posé, soit h la hauteur bD, a la largeur AB du mur, Π le poids de l'unité de volume de la matière du mur, r la résistance à un effort de traction de cette matière; pour l'unité de surface, on aura pour le moment pris par rapport à l'arête A de la poussée horizontale qui s'exerce contre D b,

$$\pi t^2\left(\frac{1}{2}Hh^2 - \frac{1}{3}h^3\right) - 2\gamma t\left(Hh - \frac{2}{3}h^2\right),$$

où l'on fait, pour abréger,

$$t = \operatorname{tang}\frac{1}{2}\tau,$$

et pour le moment pris par rapport au même point des forces qui s'opposent à ce renversement,

$$\frac{1}{6}\Pi a^2(H + 2h) + \frac{1}{3}r[a^2 + (H - h)^2].$$

Le rapport de ces moments est

$$\frac{\pi t^2(\frac{1}{2}Hh^2 - \frac{1}{3}h^3) - 2\gamma t(Hh - \frac{2}{3}h^2)}{\frac{1}{6}\Pi a^2(H + 2h) + \frac{1}{3}r[a^2 + (H - h)^2]}.$$

Il faut déterminer h par la condition que cette quantité soit un maximum.

Le cas que l'on a le plus fréquemment à considérer dans les applications est celui où la cohésion des terres est nulle et où $\gamma = 0$; le rapport précédent se réduit alors à

$$\frac{\pi t^2\left(\frac{1}{2}\mathrm{H}h^2 - \frac{1}{3}h^3\right)}{\frac{1}{6}\Pi a^2(\mathrm{H}+2h)+\frac{1}{3}r[a^2+(\mathrm{H}-h)^2]}.$$

Enfin pour déterminer h on trouve l'équation

$$rh^3 + 2(\Pi a^2 - 2r\mathrm{H})h^2 + 3r(a^2+2\mathrm{H}^2)h - \frac{3}{2}\Pi a^2\mathrm{H}^2$$
$$- 3r\mathrm{H}(a^2+\mathrm{H}^2) = 0,$$

où π et t ont disparu, en sorte que la direction suivant laquelle la rupture du mur doit s'effectuer, est devenue indépendante de la pesanteur spécifique des terres et de l'inclinaison de leur talus naturel. Si l'adhérence r de la matière dont le mur est formé était excessivement grande, l'équation précédente se réduirait à

$$h^3 - 4\mathrm{H}h^2 + 3(a^2+2\mathrm{H}^2)h - 3\mathrm{H}(\mathrm{H}^2+a^2) = 0, \quad \text{d'où} \quad h = \mathrm{H};$$

en sorte que dans ce cas la rupture du mur aurait lieu dans le plan de sa base AB.

Si, au contraire, l'adhérence r était nulle, cette même équation se réduirait à

$$4h^2 - 3\mathrm{H}^2 = 0, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{\sqrt{3}}{2}\mathrm{H},$$

en sorte que, quelle que fût l'épaisseur du mur, la hauteur bD qui déterminerait la direction de la ligne de rupture Ab serait à peu près les 0,87 de la hauteur BD. L'inclinaison de la ligne de rupture est toujours comprise entre cette limite et l'horizontale AB.

La valeur de h étant déterminée d'après ce qui précède, il faudra la substituer dans l'équation d'équilibre qui s'obtient en égalant les expressions des moments des forces qui tendent à produire ou à empêcher le renversement de la partie supérieure du mur. Cette équation est

$$\pi t^2\left(\frac{1}{2}\mathrm{H}h^2 - \frac{1}{3}h^3\right) - 2\gamma t\left(\mathrm{H}h - \frac{2}{3}h^2\right) - \frac{1}{6}\Pi a^2(\mathrm{H}+2h)$$
$$- \frac{1}{3}r[a^2+(\mathrm{H}-h)^2] = 0.$$

Si l'on y fait $\gamma = 0$, on a

$$\pi t^2\left(\frac{1}{2}\mathrm{H}h^2 - \frac{1}{3}h^3\right) - \frac{1}{6}\Pi a^2(\mathrm{H}+2h) - \frac{1}{3}r[a^2+(\mathrm{H}-h)^2] = 0.$$

En mettant pour h la valeur H qui convient au cas où l'adhérence r de la matière du mur est très-grande, on trouve

$$\frac{1}{6}\pi t^2\mathrm{H}^2 - \frac{1}{2}\Pi a^2 - \frac{1}{3}ra^2 = 0, \quad \text{d'où} \quad a = \mathrm{H}t\sqrt{\frac{\pi}{3\Pi+2r}},$$

pour l'expression de l'épaisseur qu'il faut dans ce cas donner au mur pour qu'il se maintienne en équilibre.

Si, au contraire, outre $\gamma = 0$, on suppose l'adhérence r de la ma-

tière du mur nulle, et qu'on mette pour h la valeur $\frac{\sqrt{3}}{2}$H qui convient à ce cas, l'équation d'équilibre deviendra

$$\frac{3}{4}\pi t^2 \mathrm{H}^2(3-\sqrt{3}) - \Pi a^2(1+\sqrt{3}) = 0,$$

d'où

$$a = \mathrm{H}t\sqrt{\frac{9-3\sqrt{3}}{4+4\sqrt{3}} \times \frac{\pi}{\Pi}},$$

pour l'équation de l'épaisseur du mur. C'est la plus grande valeur que le calcul puisse fournir pour cette quantité. Dans le cas d'un fluide, on fera $t = 1$.

Remarque. — Dans ce qui précède, on suppose que l'adhérence entre le mur et sa base AB est au moins égale à celle du mortier qui unit les matériaux dont ce mur est formé.

Si la quantité r avait pour le plan AB (*fig.* 73, *Pl. XI*) une valeur particulière et plus petite r', il faudrait s'assurer que le mur ne peut être détaché de sa base et renversé en entier par l'action du prisme BDT. L'équation qui exprime dans ce cas la condition de l'équilibre est

$$\frac{1}{6}\pi t^2 \mathrm{H}^3 - \gamma t \mathrm{H}^2 - \frac{1}{2}\Pi a^2 \mathrm{H} - \frac{1}{3}r'a^2 = 0,$$

et il faudra que la somme des termes négatifs soit au moins égale à celle des termes positifs. Si l'on suppose γ et $r' = 0$, comme il faut presque toujours le faire dans la pratique, cette équation se réduit à

$$\frac{1}{3}\pi t^2 \mathrm{H}^2 - \Pi a^2 = 0, \quad \text{d'où} \quad a = \mathrm{H}t\sqrt{\frac{\pi}{3\Pi}},$$

pour l'expression de l'épaisseur à donner au mur.

Les formules précédentes sont établies dans la supposition que le mur est terminé par deux faces parallèles et verticales. Les mêmes principes qui ont été employés s'appliqueront au cas où les parements du mur seraient en talus. On déterminerait toujours la direction d'une ligne de rupture Ab (*fig.* 73) par la condition que l'action d'un prisme de plus grande pousée Dbt pour renverser la portion ACDb du mur autour du point A fût la plus grande possible par rapport à l'action des forces qui s'opposent à ce renversement, et qui sont le poids de la partie du mur ACDb, et la cohésion sur la ligne Ab.

La considération du talus de la face BD changerait les résultats trouvés pour l'inclinaison du plan bt qui détermine le prisme de plus grande poussée, et pour l'expression de la poussée qu'il faudrait maintenant concevoir dirigée perpendiculairement à bD. Ces nouvelles déterminations n'ont aucune difficulté, si ce n'est celle qui résulte de la complication des formules. Les talus que l'on donne aux faces des murs dans les constructions sont ordinairement assez petits pour qu'on puisse en négliger la considération.

Si la forme du mur était plus composée, si, par exemple, il y avait des contre-forts extérieurs ou intérieurs, des arcades, etc., les mêmes principes s'appliqueraient encore. Supposant toujours, à

partir de l'arête extérieure autour de laquelle le système tend à être renversé, un plan de rupture incliné, on déterminera son inclinaison par la condition que le moment de la poussée des terres contre la partie supérieure du mur sera le plus grand possible par rapport à la résistance de cette partie au renversement. On s'assurerait ensuite que la rupture ne peut avoir lieu suivant le plan qui remplirait cette condition.

On aurait facilement égard aussi aux poids dont la surface supérieure des terres pourrait être chargée.

L'application rigoureuse des résultats précédents dans la pratique offrira toujours d'assez grandes difficultés, eu égard à l'incertitude des valeurs des constantes qui entrent dans les formules.

Pour les terres, on peut trouver les valeurs des constantes par des expériences spéciales; quant aux matériaux des murs, on peut s'aider de quelques résultats obtenus aussi dans des expériences; mais il faut remarquer que ces résultats supposent que les mortiers ont acquis toute leur consistance, ce qui n'a lieu qu'après un temps qui varie suivant la nature du mortier. Si les murs doivent soutenir la poussée des terres immédiatement après leur construction, l'adhérence des mortiers doit, le plus souvent, être supposée nulle. Les terres dont les murs sont chargés sont ordinairement des remblais qui n'offrent presque aucune cohésion; ainsi dans la pratique on doit rarement s'écarter des résultats trouvés ci-dessus dans la supposition de r et γ égaux à zéro.

Il y a des terres dont le mode d'action semble étranger aux considérations précédentes : ce sont celles qui augmentent de volume quand l'humidité les pénètre. L'action de ces terres contre les murs de revêtement est la même que celle d'un fluide qui aurait la même pesanteur spécifique qu'elles.

DES VOUTES.

Dans l'établissement d'une voûte on peut se proposer, soit de mettre en équilibre une voûte dont la figure est donnée, de manière que les parties qui tendent à être repoussées ou renversées ne le soient pas, soit de déterminer la figure de la voûte de manière à offrir, aux efforts auxquels elle est soumise, la plus grande résistance en employant le moins de matériaux. Les recherches au moyen desquelles on parvient à remplir ces conditions sont fondées sur diverses considérations, dont les principales sont celles des conditions d'équilibre d'une courbe flexible dont tous les points sont soumis à des efforts, et celles des conditions d'équilibre de plusieurs corps solides juxtaposés.

DE L'ÉQUILIBRE D'UNE COURBE FLEXIBLE.

Une courbe étant considérée comme composée de petites verges inflexibles, unies à leurs extrémités par des charnières qui permettent aux angles que forment deux verges consécutives de varier librement, imaginons qu'à chaque charnière est appliquée une force; cette courbe sera en équilibre si, ayant décomposé la force appliquée à chaque charnière en deux autres dirigées suivant les deux verges consécutives, chaque verge se trouve, après cette décomposi-

tion, tirée ou poussée en sens contraire à ses extrémités par deux forces égales.

Soient mm', $m'm''$, $m''m'''$ (*fig.* 74, *Pl. XI*), trois verges consécutives dont on vient de parler;

P, P′, les forces appliquées aux points m', m'';

α, α', les angles que la direction de ces forces fait avec l'axe horizontal de x;

a, a', a'', les angles que les verges mm', $m'm''$, $m''m'''$ font avec le même axe.

La condition d'équilibre qui vient d'être énoncée s'exprimera par l'équation

$$\frac{P}{P'}=\frac{\sin(a'-a)}{\sin(a''-a')}\times\frac{\sin(a''-\alpha')}{\sin(a'-\alpha)},$$

laquelle s'applique généralement à tout polygone composé de verges rigides, tournant librement sur des charnières; et dans le cas d'une courbe continue prend la forme

$$\frac{F}{F'}\times\frac{r'}{r}\times\frac{\alpha y''\cos\alpha'-dx''\sin\alpha'}{\alpha y\cos\alpha-dx\sin\alpha}.$$

Soient x, y, x', y', x'', y'', les coordonnées des points m, m', m''; s l'arc de la courbe compté d'un point fixe, lequel est pris pour la variable indépendante, en sorte que ds est constante, $\sin a'=\frac{dy}{ds}$, $\cos a'=\frac{dx}{ds}$, $\sin a''=\frac{dy''}{ds}$, $\cos a''=\frac{dx''}{ds}$, $\sin(a'-a)=\frac{ds}{r}$, $\sin(a''-a')=\frac{ds}{r'}$; r, r', les rayons du cercle osculateur aux points m', m''; F, F′, les valeurs des forces pour les points m', m'', lesquelles sont des poids rapportés à l'unité de longueur de la courbe, en sorte que Fds, $F'ds$, sont les forces agissant en m, m';

Et remarquons que $F'=F+dF$, $r'=r+dr$, $\alpha'=\alpha+d\alpha$, $dx''=dx+2d^2x+d^3x$ et $dy''=dy+2d^2y+d^3y$.

Substituant ces valeurs dans l'équation précédente, et négligeant les infiniment petits du troisième ordre, il vient

$$(1)\quad\left\{\begin{aligned}o=F\,[\sin\alpha\,(2rd^2x+dr\times dx)-\cos\alpha\,(2rd^2y+dr\times dy)]\\ +r(\sin\alpha dF\times dx-\cos\alpha dFdy),\end{aligned}\right.$$

équation qui établit la relation entre la figure de la courbe et les valeurs de la force F et de l'angle α, valeurs qui sont censées données en S, en sorte qu'on pourra connaître ces dernières quand la figure de la courbe sera donnée, et réciproquement.

Le polygone ou la courbe flexible étant donné en équilibre par les forces qui leur sont appliquées, l'effet de ces forces est de produire dans le sens des verges ou des éléments de la courbe une tension ou une pression, suivant que les forces tirent du côté où la courbe est convexe ou du côté opposé. Nommant T la tension ou pression qui a lieu dans le sens du côté mm', laquelle n'est autre chose que la composante de la force P dirigée suivant ce côté, on a, dans le cas du polygone,

$$(2)\qquad T=P\,\frac{\sin(a'-\alpha)}{\sin(a'-a)},$$

expression qui devient, pour la courbe,

$$T = Fr\left(\frac{dy}{ds}\cos\alpha - \frac{dx}{ds}\sin\alpha\right).$$

Si les points extrêmes du polygone ou de la courbe ne sont point fixes, l'équilibre ne pourra avoir lieu qu'autant qu'il y aura à ces points des forces appliquées dans le sens des derniers côtés, et dont la valeur soit égale à celle que T prend aux points dont il s'agit.

Application aux cas où toutes les forces sont égales et parallèles. — Supposant en premier lieu que toutes les forces soient égales et parallèles à l'axe vertical des y, on a F constante, $\alpha = \frac{1}{2}\pi$; l'équation (1) devient

$$0 = 2rd^2x + drdx \quad \text{ou} \quad rdx^2 = B\,ds^2,$$

ou $\left(\text{en remarquant que, } s \text{ étant la variable indépendante, on a } r = \frac{dyds}{d^2x}\right)$

$$B\,ds\,\frac{d^2x}{dx^2} = dy \quad \text{ou} \quad B\,ds = (A - y)\,dx,$$

d'où, mettant pour ds sa valeur, on tire

$$dx = \pm\frac{B\,dy}{\sqrt{(A-y)^2 - B^2}}$$

et

$$x = \mp B\log\left\{C\left[A - y + \sqrt{(A-y)^2 - B^2}\right]\right\};$$

mettant, au contraire, pour dx sa valeur, on a

$$ds = \pm\frac{dy\,(A-y)}{\sqrt{(A-y)^2 - B^2}} \quad \text{et} \quad s = \mp\sqrt{(A-y)^2 - B^2} + D.$$

A, B, C, D sont des constantes arbitraires qui se détermineront en fixant la longueur de la courbe et les coordonnées de ses deux extrémités.

Les constantes A et B étant déterminées, les formules précédentes peuvent être écrites plus simplement, en changeant la situation des axes des coordonnées.

Ainsi, soit l'origine des x' et y' en A', le point M est le sommet de la courbe où la tangente est horizontale, puis PM = A, A'M = B', et, s étant compté du point M (*fig.* 75, *Pl. XI*), on aura l'équation

$$\pm x' = B\log\left(\frac{y' - \sqrt{y'^2 - B^2}}{B}\right),$$

$$y' = \frac{1}{2}B\,(CB^2 + CB^{-x}),$$

$$\pm\frac{dy'}{dx'} = \frac{\sqrt{y'^2 - B^2}}{B},$$

$$\pm s = \sqrt{y'^2 - B^2},$$

$$r = \frac{y'^2}{B}.$$

L'expression générale de la pression devient ici

$$T = Fr\frac{dx}{ds} \quad \text{et donne} \quad T = Fy';$$

en donnant à y' la valeur de l'ordonnée des points N, N' auxquels la courbe se termine, on aura la valeur de la pression qui s'exerce entre ces points dans le sens de la tangente à la courbe.

Les résultats précédents supposent la force F donnée et déterminent en conséquence la figure de la courbe et la tension; si, au contraire, cette figure était donnée, on aurait, pour déterminer F (*fig.* 76, *Pl. XI*)

$$o = F(2rd^2x + dr \times dx) + rdx \times dF, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{A \times ds^2}{rdx^2}.$$

L'expression de la tension serait

$$T = F\frac{rdx}{ds}.$$

Si la courbe est un demi-cercle, on a

$$\frac{dx}{ds} = \sin\varphi, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{A}{r\sin^2\varphi}, \quad T = -Fr\sin\varphi.$$

La constante A se détermine par la condition que la force F ait une valeur déterminée pour un point donné de la courbe.

La valeur de F est infinie aux points A et B.

Application aux cas où les forces sont partout dirigées suivant la normale à la courbe. — On a dans ce cas

$$\sin\alpha = \frac{dx}{ds}, \quad \cos\alpha = -\frac{dy}{ds},$$

et, en se rappelant que ds est constant, l'équation (1) donne

$$Fdr + rdF = o, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{A}{r}$$

(A est une constante arbitraire).

Ainsi la force F et la figure de la courbe sont liées par la condition que la force soit en chaque point réciproque à celle du rayon de courbure.

L'expression de T de l'équation (2) devient

$$T = -Fr.$$

DE L'ÉQUILIBRE DE PLUSIEURS CORPS SOLIDES JUXTAPOSÉS.

Les considérations précédentes s'appliqueraient immédiatement à l'équilibre d'un grand nombre de corps solides juxtaposés, et formant une voûte, si ces corps n'avaient qu'une très-petite épaisseur dans le sens de la normale à la courbe. Mais la recherche des conditions d'équilibre des voûtes, telles qu'on les construit, exige des considérations spéciales. Pour les présenter avec ordre, il faut distinguer deux cas : 1° celui où il s'agit uniquement d'un assemblage de voussoirs dont chacun forme l'épaisseur entière de la voûte; 2° celui où des masses de maçonnerie sont superposées ou adossées latéralement aux voussoirs qui composent la voûte proprement dite.

Considérons d'abord un assemblage de voussoirs qui composent seuls la voûte : si l'épaisseur de ces voussoirs dans le sens de la nor-

male à la voûte était infiniment petite, on pourrait considérer le système comme une suite de petites verges inflexibles juxtaposées. Si la figure de la voûte n'était pas celle qui convient à l'équilibre, toutes ces verges tourneraient autour de leur point de contact et tomberaient. Quand les voussoirs ont une certaine épaisseur, en sorte qu'ils s'appuient les uns contre les autres, non plus sur une ligne, mais sur un plan d'une certaine étendue, ces effets sont modifiés en ce que les angles de deux voussoirs consécutifs ne varient point dans toute l'étendue de la voûte. Cette voûte, si elle n'est point en équilibre, se partage en plusieurs parties, dans lesquelles les voussoirs restent juxtaposés, comme s'ils étaient collés les uns contre les autres.

Si l'équilibre se rompt dans une voûte formée suivant la *fig.* 77, *Pl. XI*, les effets suivants se manifesteront :

Le joint B*c* de la clef s'ouvrira de manière que les voussoirs contigus ne s'appuieront plus que sur l'arête supérieure C; les joints inférieurs AD, *ad* s'ouvriront de manière que les derniers voussoirs ne porteront plus que sur les arêtes extérieures D, *d*. Enfin, vers les points K et *k* (appelés *joints de rupture*), il y aura un certain nombre de joints qui s'ouvriront également de manière que les voussoirs contigus ne porteront plus que sur les arêtes intérieures, et, parmi ces joints, il y en aura un qui s'ouvrira plus que les autres et où sera placé véritablement le point de rupture. Dans tout le reste de la voûte, les voussoirs contigus demeureront en contact sur toute la hauteur des joints.

Chacune des portions de la voûte dans laquelle les voussoirs demeurent en contact se comporte évidemment comme si elle ne formait qu'un seul corps solide. On voit donc que l'effet de l'épaisseur donnée aux voussoirs dans le sens des joints est de substituer à un système de petites verges inflexibles, en nombre égal à celui des voussoirs, le système d'un nombre de verges beaucoup moins grand, puisqu'il est seulement égal au nombre des parties dans lesquelles la voûte se partage, par l'effet de l'écartement des joints qui vient d'être décrit.

En général, il s'ouvre plusieurs joints vers les points K et *k*; pour établir rigoureusement l'équilibre de la voûte, il faudrait considérer vers ces points plusieurs voussoirs consécutifs ne s'appuyant les uns contre les autres que par une arête sur laquelle ils peuvent tourner; mais on ne fera jamais d'erreur sensible dans les applications, en supposant qu'il ne s'ouvre en K et *k* qu'un seul joint. La voûte devra alors être considérée comme formée de quatre parties solides ADLK, LKBC, *adlk*, *lk*BC, lesquelles portent sur la base par les points D et *d*, et s'appuient les unes contre les autres par les points K, C et *k*. Si l'équilibre se rompt, les parties supérieures s'abaissent et les parties inférieures sont renversées en tournant autour des points D et *d*.

La position des points de rupture K, *k* n'est point donnée d'avance; connaissant la figure de la voûte, on la détermine par la condition que la rupture étant supposée dans ces points, le moment des forces qui tendent à renverser les parties inférieures soit le plus grand possible, par rapport au moment de celles qui s'opposent à ce renversement. Ainsi, la figure d'une voûte étant donnée, on s'assurera si elle doit demeurer en équilibre : 1° en déterminant ainsi la

position des points de rupture; 2° en vérifiant si le moment des forces qui s'opposent au renversement est plus grand que celui des forces qui tendent à le produire.

Il y a des cas où la figure de la voûte ne laisse aucune incertitude sur la situation des points de rupture; tel est celui d'une voûte formée par un arc d'une petite amplitude et par des pieds droits verticaux (*fig.* 78, *Pl. XI*). Le point de rupture est à la rencontre de l'arc et du pied-droit.

Le joint de rupture décrit plus haut est celui qui a généralement lieu dans les voûtes, telles que nous les construisons. Il peut se faire que pour d'autres figures de voûtes et pour certaines distributions des poids dont on les chargerait les circonstances de la rupture soient différentes, mais le même principe s'y manifestera toujours; c'est-à-dire que la voûte se partagera toujours en un certain nombre de parties dans chacune desquelles les voussoirs demeureront en contact sur toute l'étendue du plan du joint; ces portions se comporteront, par conséquent, comme des corps solides portant sur la base, ou les uns contre les autres, par des arêtes sur lesquelles ils peuvent tourner librement. La position des points de rupture sera toujours susceptible d'être déterminée par des conditions de maxima et minima.

Les conditions de l'équilibre d'une voûte peuvent être exprimées par le calcul, comme il suit : Soient x, y les distances horizontale et verticale DI et KI (*fig.* 79, *Pl. XI*) du point de rupture K au point d'appui D; x', y' les distances KR et CR du point C au point K; α la distance horizontale DP au point D du centre de gravité M de la portion de voûte qui charge la verge DK; α' la distance horizontale KQ au point K du centre de gravité N de la portion de voûte qui charge la verge CK; m, n, les poids des portions de voûte chargeant les leviers DK et CK. On a, en décomposant les poids m, n, en d'autres appliqués aux points D, K, C,

force verticale agissant en K. . . . . . $m\dfrac{\alpha}{x} + n\dfrac{x'-\alpha'}{x'}$,

force verticale agissant en C. . . . . . $2n\dfrac{\alpha'}{x'}$.

Cette dernière, décomposée dans le sens des verges CK, Ck, produit

en K une autre force verticale. . . . . $n\dfrac{\alpha'}{x'}$,

et une force horizontale. . . . . $n\dfrac{\alpha'}{y'}$.

Par conséquent le moment de la force qui tend à renverser la partie inférieure, pris par rapport au point D, est

$$n\alpha'\frac{y}{y'},$$

et celui de la force qui s'oppose au renversement,

$$m\alpha + nx.$$

La situation des joints de rupture doit être déterminée par la condi-

tion que le rapport

$$\frac{n\alpha' y}{(m\alpha + nx) y'}$$

soit un maximum, et il faudra vérifier ensuite si l'équation d'équilibre

$$n\alpha' y - (m\alpha + nx) y' = 0$$

est satisfaite; c'est-à-dire si la somme des termes négatifs est au moins égale à celle des termes positifs.

Dans ce qui précède, on a fait abstraction de l'adhérence des mortiers. On pourrait en tenir compte, en la considérant comme une force qui s'oppose à l'écartement des voussoirs dont les joints s'ouvrent. Dans la presque totalité des applications, cette force doit être considérée comme nulle.

Les parties inférieures de la voûte peuvent encore céder à l'action des parties supérieures en glissant sur leur base. Conservant les dénominations précédentes et nommant de plus f le rapport du frottement à la pression, on aura, pour la force horizontale qui tend à produire le glissement,

$$n\frac{\alpha'}{y'},$$

pour la force qui tend à l'empêcher,

$$f(m + n).$$

Cette dernière force, si l'on a égard à l'adhérence entre la surface inférieure du pied-droit et sa base, sera exprimée, en nommant a l'épaisseur du pied-droit et v l'adhérence pour l'unité de surface, par

$$f(m + n) + va.$$

La position des joints de rupture devra être déterminée par la condition que le rapport

$$\frac{n\alpha'}{f(m + n) y' + vay'}$$

soit un maximum, et il faudra ensuite vérifier si l'équation d'équilibre

$$n\alpha' - f(m + n) y' - vay' = 0$$

est satisfaite.

Une considération importante est celle des pressions qui ont lieu dans les diverses parties de la voûte. Dans le système des quatre verges unies par des charnières, par lequel on est conduit à remplacer la voûte, on a, pour la pression qui s'exerce dans le sens de la verge CK,

$$n\frac{\alpha' \sqrt{x'^2 + y'^2}}{x' y'},$$

et pour celle qui s'exerce dans le sens de la verge DK,

$$\left(\frac{m\alpha + nx}{y} + \frac{n\alpha'}{y'}\right)\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x}.$$

La pression verticale qui a lieu aux points D et α est. . . . $m + n$.

La pression mutuelle horizontale des deux portions de la voûte en C est. . . . . $\frac{n\alpha'}{y'}$.

Si le plan tangent commun aux deux surfaces en contact en K et k fait avec l'horizon un angle ω, la pression qui a lieu en ces points est

$$n\left(\sin\omega + \frac{\alpha'}{y'}\cos\omega\right).$$

Dans la voûte, les trois pressions dont on vient de donner les valeurs doivent être considérées comme s'exerçant contre des points, ou plutôt contre des arêtes de contact. Il n'y a à cet égard aucune différence entre le système des quatre verges considérées ci-dessus et la voûte même. Quant aux pressions qui ont lieu dans les joints des voussoirs qui composent les quatre portions dans lesquelles la voûte se partage, les deux premières des expressions précédentes donnent des limites que les pressions dont il s'agit ne peuvent surpasser pour aucun point de ces joints. Mais comme on ignore la manière dont la pression, en se transmettant d'un voussoir à l'autre, se répartit dans la hauteur de chaque plan de joint, on ne peut connaître la valeur précise de cette pression, pour un point donné de chaque plan de joint. Ce n'est qu'aux points de rupture D, K, C, k, d, que, sachant d'avance que les voussoirs contigus ne s'appuient que sur des arêtes de contact, on ne peut pas douter que toute la pression ne doive s'exercer contre ces arêtes.

On doit remarquer que les pressions qui ont lieu dans les voûtes aux points où il est le plus important de les considérer, s'exerçant ainsi contre des arêtes, ou du moins contre une petite portion de la hauteur des joints, on ne peut évaluer ici la résistance de la pierre à l'écrasement. Il faudrait, pour apprécier avec exactitude la résistance des pierres dans les circonstances dont il s'agit, des expériences spéciales où ces circonstances eussent été imitées fidèlement.

Connaissant les conditions de l'équilibre d'une voûte supposée formée, ainsi que ses pieds-droits, par des voussoirs qui en occupent toute l'épaisseur, en sorte qu'il ne peut se faire aucune division dans l'épaisseur de la voûte ou des pieds-droits, on passera au cas général où la voûte et les pieds-droits ou culées sont formés en partie par des masses de maçonnerie de petits matériaux, en ayant égard aux disjonctions qui peuvent survenir dans ces masses par suite des mouvements des portions de la voûte.

Si, par exemple, on a une voûte formée par un arc de cercle porté sur des pieds-droits verticaux (*fig.* 80, *Pl. XI*), cas auquel les points de rupture sont placés en K, k, on ne peut douter que si les parties inférieures venaient à céder, il ne se fît une lézarde verticale à partir des joints placés en K, k, laquelle séparerait les parties agissantes de la voûte des parties résistantes. Appliquant ensuite à ces dernières les considérations qui précèdent, et supposant qu'elles cèdent en étant renversées, on verra qu'il devra, lors de ce renversement, se former dans ses parties une rupture suivant une ligne partant des points D, d, et qui fera, avec DA, da, un angle d'autant plus grand que l'adhérence de la matière des pieds-droits sera moindre. Au-dessous d'une certaine valeur de l'adhérence, la ligne de rupture se confondra avec DK, dk, et ce sera dans cette situation qu'il faudra la supposer pour être certain de ne pas évaluer trop haut la résistance. On voit alors que la poussée des parties supérieures CK, Ck de la

voûte est uniquement balancée par la résistance au renversement des portions DKE, *dke* des pieds-droits, en faisant toutefois abstraction de l'adhérence sur la surface de rupture DK, *dk*.

Les considérations précédentes s'appliqueront toujours à la voûte, quelle que soit sa figure. Les parties inférieures devront toujours être considérées comme susceptibles de se disjoindre lors de leur renversement suivant des lignes telles que DF, *df* (*fig.* 81; *Pl. XI*), en sorte que la résistance au renversement des portions DEKF, *dekf*, soutient seule la poussée des parties supérieures CK, C*k*. En général, la direction des lignes DF, *df*, la position des joints de rupture K, *k* doivent se déterminer par la condition que le moment de la poussée, divisé par le moment de la résistance au renversement, soit un maximum. On parvient à cette détermination par des tâtonnements. Les conditions de l'équilibre s'expriment d'ailleurs par le calcul, comme on l'a vu précédemment.

DES CONSTRUCTIONS EN CHARPENTE.

Les constructions en charpente offrent en général un système de pièces assujetties les unes aux autres à leurs extrémités seulement ou dans divers points de leur longueur. On peut étudier les conditions de leur équilibre sous deux points de vue différents : 1° considérant chaque pièce comme une verge inflexible, on peut d'abord chercher à reconnaître si les efforts auxquels le système est soumis ne tendent point à changer sa figure, en faisant tourner les pièces autour des points dans lesquels elles sont assemblées ; 2° on peut ensuite, considérant chaque pièce en particulier, examiner si elle est capable de résister aux efforts qu'elle supporte. Avant d'appliquer les considérations de ce genre aux principales constructions en charpente, on examinera quelques assemblages ou systèmes de pièces qui s'emploient quelquefois dans ces constructions.

DES POUTRES ARMÉES ET AUTRES COMBINAISONS ANALOGUES.

La distance des points d'appui d'une pièce étant trop grande, eu égard aux efforts auxquels elle peut être exposée, pour qu'on la forme d'un seul morceau de bois, on la compose de l'assemblage de plusieurs morceaux assujettis les uns aux autres.

La plus simple de ces combinaisons est celle où plusieurs pièces prismatiques à base rectangulaire sont placées les unes sur les autres (*fig.* 82, *Pl. XI*). La réunion de ces pièces offre une résistance égale à la somme des résistances de chacune, abstraction faite de l'effet du frottement qui résulterait des brides ou autres moyens qu'on aurait pu employer pour serrer les pièces les unes contre les autres.

Si les pièces sont assujetties par des boulons (*fig.* 83, *Pl. XI*), par des broches, par un assemblage ou crémaillère, ou par tout autre moyen qui empêche les faces en contact de glisser les unes sur les autres, leur assemblage offre la même résistance que s'il était formé d'une seule pièce. Cette circonstance aura même lieu, à très-peu près, si chaque cours de pièces est formé de plusieurs morceaux, pourvu que les joints soient croisés et la construction bien exécutée. L'éva-

luation de cette résistance pourra se faire d'après ce qu'on a vu précédemment.

Quand les assemblages de ce genre ne sont pas prismatiques, il faut, pour évaluer leur résistance, leur donner la figure d'un solide d'égale résistance, laquelle dépendrait de la nature des efforts auxquels ils sont soumis. Si la pièce n'a point cette figure, elle présentera quelque part une section de moindre résistance, laquelle se connaîtra d'après ce qu'on a vu sur cet objet. C'est par la résistance à la rupture ou à la flexion dans cette section que la résistance de la pièce devra être évaluée.

Un assemblage du genre de ceux qu'on considère (*fig.* 84, *Pl. XI*), peut être formé par des cours de pièces assujetties les unes aux autres, mais mises en contact. Si les moyens de liaison ne sont pas assez puissants pour qu'une ligne telle que mn, qui aurait été tracée avant la flexion perpendiculairement à la longueur de l'assemblage, devienne, après la flexion, une normale commune aux deux courbes formées par les deux pièces, sa résistance ne sera que la somme des résistances de chaque pièce, et il n'y aura aucun avantage à les éloigner l'une de l'autre.

Mais si les moyens de liaison sont tels, que la circonstance indiquée ci-dessus ait lieu (*fig.* 85, *Pl. XI*), la résistance du système est égale à la différence des résistances qu'offriraient deux pièces pleines, dont l'une aurait pour hauteur mn et l'autre $m'n'$. Cette résistance augmente avec la distance des pièces. Une expérience de M. Duleau vient à l'appui de ce principe.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA DISPOSITION DES CONSTRUCTIONS EN CHARPENTE.

Les assemblages par lesquels les pièces de charpente sont assujetties les unes aux autres, ordinairement placés aux extrémités de ces pièces, n'offrant généralement qu'une faible résistance aux efforts qui tendraient à faire tourner les pièces sur les extrémités, on peut faire abstraction de cette résistance, et considérer une construction en charpente comme un système de verges unies à leurs extrémités par des charnières sur lesquelles elles peuvent tourner librement.

Ce système devra toujours être composé de manière qu'il soit en équilibre, c'est-à-dire que sa figure ne tende point à changer par suite des efforts exercés sur lui, et, de plus, que cet équilibre soit stable.

La première condition sera remplie en faisant en sorte que les efforts exercés soient décomposés à leurs points d'application suivant des pièces dirigées de ces points aux points d'appui de la construction. Alors tous les efforts s'exercent dans le sens de la longueur des pièces, et aucun ne tend à les faire tourner sur leurs extrémités. Quant à la seconde condition, si le système ne comporte pas un équilibre stable, on procure aux assemblages la résistance nécessaire, ou même on ajoute des pièces destinées spécialement à empêcher tout changement de figure.

Enfin, chaque pièce composant le système, devra offrir une résistance proportionnée à l'effort exercé sur elle. Nous allons indiquer

maintenant l'application de ces principes aux divers genres de constructions en charpente.

DES CONSTRUCTIONS SOUMISES A DES EFFORTS VERTICAUX ET PORTÉES SUR PLUSIEURS POINTS D'APPUI.

Les constructions dont il s'agit ici sont principalement les pans de bois qui entrent dans la construction des maisons, les palées des ponts et estacades, etc.

Une charge verticale étant répartie sur une pièce horizontale MNO (*fig.* 86, 87, 88 et 89, *Pl. XI*), il s'agit d'établir une construction en charpente qui transmettra cette charge aux points d'appui A, B, C, etc., c'est ce que l'on fera au moyen de poteaux verticaux AM, BN, CO, etc., Le système sera en équilibre, mais son équilibre ne sera point stable, et il faudra prévenir le changement de figure par l'emploi de pièces inclinées. Ces pièces pourront être placées de diverses manières indiquées par les figures ci-dessus, suivant l'espacement des points d'appui, et la grosseur des bois qu'on emploiera comparée à la charge.

La détermination de l'effort exercé sur chaque pièce et de la résistance qui lui est nécessaire se fera de la manière suivante :

1°. *Quant aux pièces horizontales sur lesquelles la charge est répartie, et qui la transmettent aux pièces verticales et inclinées :*

Si ces pièces sont composées de morceaux tels que MN, allant d'un point d'appui à l'autre, chacun résistera comme une pièce portée sur ses deux extrémités.

Si elles sont composées de morceaux tels que MP, qui occupent plusieurs intervalles des points d'appui, chaque portion telle que MN ou OP devra être considérée comme une pièce encastrée à une extrémité et portée à l'autre. Chaque portion telle que NO devra être considérée comme une pièce encastrée aux deux extrémités.

2°. *Quant aux pièces verticales et inclinées,* le procédé le plus simple consiste à décomposer, suivant la théorie du levier, la charge correspondante à l'intervalle de deux pièces consécutives, en deux poids suspendus aux extrémités supérieures de ces pièces. Ces poids exprimeront, pour les pièces verticales, l'effort qui s'exerce dans le sens de leur longueur. Le même effort s'obtiendra pour les pièces inclinées, en divisant le poids correspondant par le cosinus de l'angle que la direction de ces pièces forme avec la verticale.

Le dernier calcul qui vient d'être indiqué n'est point en général propre à représenter exactement les effets naturels.

Si l'on considère chaque morceau de la pièce horizontale qui reçoit la charge comme une verge rigide, on sait que les pressions qui s'exerçaient en vertu de cette charge sur les divers points d'appui de ce morceau demeuraient indéterminées entre certaines limites, quand ces points d'appui sont en nombre plus grand que deux. On pourrait peut-être considérer les morceaux dont cette pièce est composée comme des verges élastiques, et déterminer alors les effets supportés par chaque point d'appui par des considérations analogues à celles qui ont été développées plus loin. Supposons, par exemple, que la pièce MP (*fig.* 89, *Pl. XI*) est uniformément chargée, on regarderait chacune de ses moi-

liés MC (*fig.* 90, *Pl. XI*) comme une verge encastrée horizontalement à l'extremité C dont tous les points supporteraient des efforts verticaux, et qui serait soumise en outre à l'action des forces verticales P, P', appliquées de bas en haut aux points M, N. Ayant formé, d'une manière semblable à ce qu'on a vu antérieurement, les équations de l'équilibre de la verge et écrivant ensuite dans ces équations que les points M, N ont des solutions déterminées par rapport au point C, ces équations donneraient les valeurs des forces P, P' qui expriment les pressions exercées sur les points d'appui.

DES CONSTRUCTIONS SOUMISES A DES EFFORTS HORIZONTAUX ET PORTÉES SUR PLUSIEURS POINTS D'APPUI.

Ces constructions sont principalement les fermes des estacades, des revêtements qui soutiennent la poussée des terres ou des eaux, des coffres en charpente qui servent à la construction des jetées dans quelques ports, etc.

La construction étant soumise à un effort qui s'exerce contre la pièce ANOP (*fig.* 91, *Pl. XI*) perpendiculairement à sa direction, et A, B, C, D étant les points d'appui de cette construction, on doit la former de pièces dirigées suivant BN, CO, DP. Considéré comme un assemblage de verges inflexibles unies à leurs extrémités par des charnières, le système est en équilibre, et son équilibre est stable, en sorte qu'il n'est besoin d'ajouter aucune pièce pour prévenir le changement de figure.

Si les pièces inclinées avaient trop de longueur (*fig.* 92, *Pl. XI*), eu égard à l'équarrissage qu'on peut leur donner, pour offrir une résistance suffisante, ou si elles devaient être faites de plusieurs morceaux, on lierait la construction par des pièces horizontales. Leur objet serait de s'opposer à un changement de figure provenant, non d'un défaut d'équilibre dans le système, mais de ce que chaque verge qui le compose n'est point suffisamment rigide. Ces pièces horizontales sont presque inutiles quand les verges sont étendues et non comprimées.

Si le système est composé de deux côtés à des efforts latéraux (*fig.* 93, *Pl. XI*), ce qui est le cas des coffres en charpente, il doit offrir l'assemblage de deux systèmes analogues aux précédents.

Dans la plupart des constructions de ce genre, les efforts exercés sont variables, ou ne peuvent être évalués exactement. Quand ils pourront l'être, les actions exercées sur chaque pièce s'évalueront conformément à ce qui a été dit plus haut. Les pressions agissant dans chaque intervalle AN, NO, OP (*fig.* 91) perpendiculairement à la pièce ANOP seront décomposées en d'autres appliquées aux points A, N, O, P. Ces dernières forces exprimées par r produiront, dans le sens des lignes NB (*fig.* 94, *Pl. XII*), l'effort $p = \frac{r}{\cos\alpha}$ qui tendra à les comprimer dans le sens de AN, un effort $q = r\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$ qui tirera la pièce dans le sens de sa longueur; l'assemblage en A devra être consolidé de manière à résister à cette action.

DES CONSTRUCTIONS SOUMISES A DES CHARGES VERTICALES ET PORTÉES SUR DEUX POINTS D'APPUI SEULEMENT.

Les constructions dont il s'agit sont principalement les fermes des combles; leur objet est de faire porter la charge sur deux points d'appui, sans qu'il soit exercé contre ces points aucune action horizontale.

Cet objet est rempli de la manière la plus convenable au moyen des dispositions indiquées dans les *fig.* 95, 96, 97 et 98, *Pl. XII*. Les plus simples sont préférables. Les dernières ne s'emploient qu'autant que la longueur des arbalétriers comparée aux dimensions des pièces dont on dispose, oblige à multiplier leurs points d'appui. On doit préférer en général la disposition de la *fig.* 97 à celle de la *fig.* 98, et, pour s'en tenir à la première, former, s'il est nécessaire, les arbalétriers de pièces doubles ou triples. Tous ces systèmes considérés comme un assemblage de verges inflexibles unies à leurs extrémités par des charnières sont en équilibre, et leur équilibre est stable.

Si pour de très-grands combles, les dispositions précédentes n'offraient pas assez de solidité, on devrait employer un arbalétrier courbe (*fig.* 99, *Pl. XII*). En combinant convenablement la forme de cet arbalétrier, avec les rapports des poids répartis sur sa longueur, on pourra faire en sorte qu'il n'ait aucune tendance à rompre, et que l'action de ces poids ne produisant qu'une pression dans le sens de la courbe, tende seulement à écraser l'arbalétrier en le comprimant dans le sens de sa longueur; mais un tel équilibre n'étant point stable, il faut prévenir les changements de figure, ce qui peut se faire en formant l'arbalétrier courbe (*fig.* 100, *Pl. XII*) de manière qu'il offre une résistance à la flexion, ou en plaçant des pièces inclinées uniquement destinées à lier la construction. L'emploi d'un arbalétrier courbe paraît être la disposition la plus convenable quand les combles sont faits en fer.

Quant à la manière de se rendre compte des efforts auxquels les pièces qui composent les combles sont exposées, considérons en premier lieu la disposition la plus simple (*fig.* 101, *Pl. XII*). Soit $2p$ le poids distribué uniformément le long de ac et de bc. On peut le décomposer en deux autres poids p suspendus en a, c, ou en b, c. Alors le poids c est chargé d'un poids $2p$ lequel produit (en appelant α l'angle de ac avec la verticale) dans le sens des arbalétriers des forces $r = \frac{p}{\cos\alpha}$.

Ces forces r équivalent chacune à une force verticale p et à une force horizontale $q = p\,\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$. La force q exprime à la fois la pression horizontale que les arbalétriers exercent en C l'un contre l'autre, et la tension qui a lieu dans l'entrait ab. Les pressions verticales qui ont lieu en a, b sont, chacune, égales à $2p$.

D'après cela, on doit se représenter chaque arbalétrier comme une verge qui serait tenue en équilibre par les forces suivantes (*fig.* 102, *Pl. XII*) : deux forces horizontales q égales et opposées, appliquées à chaque extrémité; un poids $2p$ réparti uniformément le long de la

verge, et une force verticale $2p$ agissant de bas en haut à l'extrémité inférieure a. L'action de ces forces tend à fléchir ou à rompre la verge, et pour soumettre cet effet au calcul, il faut connaître le point m dans lequel, lors de la flexion, la courbure serait un maximum, et où la rupture tendrait à se faire. En remarquant que dans la flexion de la verge il s'établit dans chacune de ses sections transversales un axe d'équilibre autour duquel agissent, d'une part, les résistances à la flexion, et, d'autre part, les forces appliquées aux parties *am* ou *cm* de la verge qui produit cette flexion, on verra que le point où la courbure est la plus grande, est nécessairement celui pour lequel le moment des forces qui produisent la flexion, pris par rapport à l'axe d'équilibre dont on vient de parler, est un maximum. Nommant b la distance *cd*, y la distance *cn*, $2p\,\frac{y}{b}$ sera le poids réparti sur *mc*.

Le moment de la force q pris par rapport à m, moins le moment du poids $2p\,\frac{y}{b}$ pris par rapport au même point, est égal à

$$qy - 2p\,\frac{y}{b}\times\frac{1}{2}\,\text{tang}\,\alpha \quad \text{ou} \quad p\,\frac{(b-y)}{b}\,y\ \text{tang}\,\alpha.$$

Ce moment mesure l'action des forces appliquées en mC pour opérer la flexion en m, et il est nécessairement égal au moment des forces appliquées en *ma* pris par rapport au même point, comme on peut le vérifier. Sa valeur sera la plus grande possible quand on aura $y=\frac{1}{2}\,b$. Ainsi c'est au milieu de sa longueur que l'arbalétrier tend à rompre.

Connaissant le point où la flexion est la plus grande, et où la rupture tend à se faire, on pourra considérer chaque portion *am* ou *cm* de l'arbalétrier, comme un solide encastré à l'extrémité m et soumis à l'action des forces qui agissent sur cette portion; ce qui rentre dans les considérations qui ont été présentées précédemment.

Les considérations précédentes pourront toujours servir à évaluer la résistance nécessaire à chaque pièce de la construction, pourvu que l'on connaisse les forces sous lesquelles cette pièce est tenue en équilibre. On indiquera par un exemple comment on peut parvenir à cette connaissance.

Soit le comble indiqué par la *fig.* 103, *Pl. XII*, et soient :

α l'angle des arbalétriers *ac*, *bc* avec la verticale;
β l'angle des contrefiches *df*, *ef* avec la verticale;
n le poids réparti uniformément en *cd* ou *ce*;
m le poids réparti uniformément en *ad* ou *be*;
o le poids du poinçon *cf*;
p le poids de chacune des contrefiches *df*, *ef*;
q le poids de chaque moitié de l'entrait *ab*.

Considérant les arbalétriers comme formés chacun de deux morceaux distribués le long de chaque verge dont le joint est en d ou en e; considérant aussi l'entrait comme formé de deux morceaux *af*, *bf*, attachés dans le sens de la longueur seulement; assimilant le sys-

tème à celui de verges inflexibles unies à leurs extrémités par des charnières, et décomposant les poids distribués le long de chaque verge en d'autres suspendus à chaque charnière; on a

Poids suspendu en *a* ou *b*..... $\frac{1}{2}m+\frac{1}{2}q$,

en *d* ou *e*..... $\frac{1}{2}m+\frac{1}{2}n+\frac{1}{2}p$,

en *c*......... $n+o$,

en *f*......... p,

en *g*......... q.

Le poids $\frac{1}{2}(m+n+p)$ suspendu en *d*, décomposé suivant *da* et *df*, produit

dans le sens de la force : $\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin 6}{\sin(\alpha+6)}$,

et dans le sens *df* : $\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+6)}$.

Cette dernière force, supposée appliquée en *f* et décomposée horizontalement et verticalement, produira

une force horizontale $\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\alpha\sin 6}{\sin(\alpha+6)}$,

et une force verticale $\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos 6}{\sin(\alpha+6)}$.

La force horizontale sera détruite par une force égale fournie par l'autre côté du comble, et la force verticale s'ajoutera avec une force égale fournie par l'autre côté du comble pour charger le point *f*. D'après cette décomposition, on voit que la somme des forces verticales placées en *e*, *f*, *g* qui tirent en bas le point *c* est

$$n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos 6}{\sin(\alpha+6)},$$

laquelle, décomposée dans le sens de *cd*, *ce*, produit des forces

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q\,(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos 6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{1}{\cos\alpha}.$$

En sorte que la pression horizontale qui s'exerce en *c* de la part des arbalétriers contre les forces du poinçon, est

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos 6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}.$$

Si à la pression qui s'exerce suivant *cd* on ajoute celle qui provient de la décomposition du poids suspendu en *d*, on aura pour la pression qui s'exerce suivant *da* ou *eb*,

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q\,(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos 6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{1}{\cos\alpha}$$
$$+\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin 6}{\sin(\alpha+6)}.$$

Cette force produit une composante horizontale

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha+\beta)}\right]\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$$
$$+\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)},$$

laquelle exprime la tension qui s'exerce suivant l'entrait ab, et une composante verticale

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha+\beta)}\right]$$
$$+\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\beta\cos\alpha}{\sin(\alpha+\beta)},$$

ou

$$\frac{1}{2}m+n+\frac{1}{2}o+p+\frac{1}{2}q,$$

qui, étant ajoutée au poids $\frac{1}{2}m+\frac{1}{2}q$ appliqués en a, donnera la moitié du poids du comble.

On peut maintenant considérer à part chacune des pièces dont le comble est formé, voir les forces auxquelles elle est soumise, ayant convenablement égard à la considération que la charge propre de chaque pièce est uniformément répartie sur la longueur, on trouvera les résultats suivants :

1°. Le poinçon cg est tiré dans le sens de sa longueur au-dessous du point c par la force

$$n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha+\beta)}.$$

2°. Chaque contrefiche df (*fig.* 104, *Pl. XII*) est chargée du poids p distribué sur sa longueur. A l'extrémité d agit la force

$$\frac{1}{2}(m+n)\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+\beta)}$$

dirigée suivant df, et la force

$$\frac{1}{2}p\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)}$$

dirigée suivant ad. A l'extrémité f agit la force horizontale

$$\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)},$$

et la force verticale

$$\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\cos\beta\sin\alpha}{\sin(\alpha+\beta)}+\frac{1}{2}p.$$

3°. La portion cd des arbalétriers est chargée du poids n distribué uniformément sur sa longueur. Au point c agissent la force verticale

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha+\beta)}\right],$$

et la force horizontale

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}.$$

Au point d agissent dans le sens ad (*fig.* 105, *Pl. XII*) la force

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{1}{\cos\alpha}+\frac{1}{2}\frac{n\sin6}{\sin(\alpha+6)},$$

et, dans le sens fd, la force

$$\frac{1}{2}n\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+6)}.$$

4°. La portion ad des arbalétriers est chargée du poids m distribué uniformément suivant sa longueur. A l'extrémité d agissent dans le sens de la force

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{1}{\cos\alpha},$$

et, dans le sens fd, la force

$$\frac{1}{2}m\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+6)}.$$

A l'extrémité inférieure a agissent la force verticale

$$m+n+\frac{1}{2}o+p+\frac{1}{2}q,$$

et la force horizontale

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos6}{\sin(\alpha+6)}\right]$$
$$+\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin6\sin\alpha}{\sin(\alpha+6)}.$$

5°. Chaque portion ag ou bg de l'entrait supporte le poids q distribué sur sa longueur. A chaque extrémité est appliquée une force verticale $\frac{1}{2}q$ et deux forces horizontales

$$\frac{1}{2}\left[n+o+p+q+(m+n+p)\frac{\sin\alpha\cos6}{\sin(\alpha+6)}\right]\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$$
$$+\frac{1}{2}(m+n+p)\frac{\sin\alpha\sin6}{\sin(\alpha+6)},$$

qui tirent cet entrait suivant sa longueur

Connaissant ainsi les forces sous l'action desquelles chaque pièce est tenue en équilibre, on déterminera le point où cette pièce tend à rompre, lequel se trouvera toujours au milieu de sa longueur quand les poids dont elle est chargée seront répartis uniformément sur cette longueur. Connaissant ce point, la question de l'équilibre de cette verge rentrera dans celles qui ont été traitées précédemment.

Au moyen de décompositions analogues aux précédentes, on parviendrait toujours à connaître les forces appliquées à chaque pièce

d'une construction en charpente, et, par suite, à évaluer la résistance qu'elle doit offrir. Mais tout ce qui précède suppose que le système puisse être assimilé à un assemblage de verges inflexibles unies à leurs points de jonction par des charnières, sur lesquelles elles peuvent tourner librement. Le véritable état des choses diffère de cette hypothèse : 1° en ce que les pièces ne sont pas inflexibles; 2° en ce que les assemblages aux extrémités offrent une résistance aux mouvements de rotation; 3° en ce que quelques pièces viennent souvent s'assembler vers le milieu de la longueur des autres. Ainsi, dans l'exemple que nous avons traité ci-dessus, il arriverait que l'arbalétrier *ac* serait d'une seule pièce, aussi bien que l'entrait *ab*, en sorte qu'il faudrait prendre en considération leur résistance à la flexion en *d* et en *g* qui a été supposée nulle.

L'effet de la flexibilité des pièces est, en général, de rendre la résistance du système moindre que les calculs des numéros précédents ne la donneraient. L'effet des deux autres circonstances qui viennent d'être indiquées est, au contraire, de rendre cette résistance plus grande. Il s'établit donc une compensation, et il est présumable que dans la plupart des cas les calculs précédents conduiraient à une limite au-dessus de laquelle la résistance du système se trouverait placée. On pourrait d'ailleurs avoir égard à l'effet de l'élasticité des pièces, en employant des considérations analogues à celles indiquées plus haut; mais elles compliqueraient beaucoup les solutions, et pourraient les rendre impraticables.

DES CONSTRUCTIONS SOUMISES A DES CHARGES VERTICALES PORTÉES SUR DEUX POINTS D'APPUI ET CONTENUES ENTRE DEUX PLANS FIXES.

Ces constructions sont principalement les fermes des ponts en charpente; elles diffèrent des précédentes en ce que leurs points d'appui sont ordinairement susceptibles de soutenir également une charge verticale et un effort horizontal. Elles en diffèrent aussi généralement par la figure du système et parce qu'elles doivent résister, non-seulement à une charge permanente, mais à des charges passagères, animées de vitesse, et imprimant à la construction un mouvement d'oscillation. Cette dernière circonstance oblige à lier toutes les parties de la construction avec plus de soin, et à ajouter même dans quelques cas des pièces uniquement destinées à opérer cette liaison.

Si nous cherchons à soutenir la charge au moyen de pièces dirigées des points où cette charge est appliquée aux points d'appui, il paraît que les dispositions les plus convenables sont celles indiquées *fig.* 106, 107, 108, 109, 110, *Pl. XII*, lesquelles deviennent d'autant plus compliquées que l'intervalle des points d'appui est plus grand. Les dispositions de ce genre n'offrent une solidité suffisante qu'autant que l'inclinaison des contrefiches diffère peu d'un demi-angle droit, en sorte que quand la distance des points d'appui est considérable, elles occupent une grande hauteur.

La *fig.* 109 n'offre pas la même solidité que la construction 108; il serait mieux de s'en tenir à cette dernière, en formant, s'il était nécessaire, les contrefiches de pièces doubles ou triples. Quand les points d'appui sont fort éloignés ou quand on veut donner à la construction

peu de hauteur, il paraît convenable d'employer une pièce courbe formée de plusieurs cours de pièces (*fig.* 110, *Pl. XII*). La charge permanente du plancher et le poids même de la pièce courbe ne tendent point ou presque point à changer sa figure. Elle ne peut céder que par l'effet de la diminution du volume des bois. La charge accidentelle des voitures ne peut d'ailleurs opérer dans cette pièce qu'une flexion très-petite comparativement à celles qui auront lieu dans une pièce égale simplement posée sur deux appuis.

Il n'est pas utile par cette raison de chercher à procurer à la pièce courbe dont il s'agit une grande résistance à la flexion au moyen d'une disposition spéciale des assemblages.

Quand la charpente des ponts est en fer, la dernière disposition qui vient d'être indiquée est la seule convenable. La pièce courbe devient alors une portion de voûte, composée de voussoirs qu'on doit rendre invariables de forme, soit en les faisant pleins, soit en mettant dans l'intérieur des pièces en diagonales. Cette portion de voûte (*fig.* 111, *Pl. XII*), considérée comme verge élastique courbe, n'a besoin d'offrir, comme on vient de le dire, qu'une fort petite résistance à la flexion. Sa résistance à la flexion peut néanmoins être considérable, au moyen de ce que les voussoirs ne sont pas simplement posés les uns contre les autres comme dans les voûtes en pierre, mais liés de manière qu'aucun joint ne peut s'ouvrir, et que leur assemblage forme un seul corps.

Un pont en charpente est toujours composé de plusieurs fermes. Ces fermes doivent être liées les unes aux autres par des pièces dont l'objet est de rendre stable l'équilibre du système. Pour se rendre compte de cet objet, on considérera en premier lieu une seule ferme, en la regardant comme un système de verges inflexibles, unies à leurs extrémités par des charnières qui leur permettent de tourner horizontalement sur ces extrémités. Si l'on admet qu'aux extrémités A, B, de la ferme les verges soient attachées par des charnières aux points fixes contre lesquels les verges s'appuient, l'équilibre de la ferme sera stable; car les verges ne pourront sortir du plan où elles sont situées sans s'allonger, ce qui est supposé impossible. Mais si les verges aux extrémités A et B sont simplement posées contre les points d'appui, l'équilibre de la ferme n'est point stable, on doit la considérer comme ne pouvant se soutenir.

Tout ce qui vient d'être dit d'une seule ferme est également vrai de l'assemblage de deux ou plusieurs fermes placées à côté les unes des autres, lors même qu'on les aurait assujetties par des pièces dirigées perpendiculairement aux plans de ces fermes.

Mais si l'on assujettit les fermes par des pièces dirigées diagonalement (*fig.* 112, *Pl. XII*), les circonstances ne seront plus les mêmes. La figure du système, considéré toujours comme l'assemblage de verges inflexibles unies à leurs extrémités sur lesquelles elles peuvent tourner librement, est invariable, et par conséquent l'équilibre est stable. A la vérité, les verges ne sont point rigoureusement inflexibles, mais l'assemblage des fermes doit être considéré comme ne formant qu'un seul corps qui ne peut fléchir horizontalement que de la manière indiquée par la *fig.* 113, *Pl. XII*. La résistance d'un corps à la flexion est

une force d'autant plus considérable que la largeur du corps est plus grande comparativement à sa longueur, et cette force ramène toujours le système dans sa situation primitive lorsqu'il en a été écarté, et assure la stabilité de son équilibre.

Appliquant les considérations précédentes à l'établissement des ponts, on en déduit les principes suivants : Pour qu'un assemblage de fermes verticales, lesquelles sont assemblées par des pièces perpendiculaires aux plans de ces fermes, offre un équilibre stable, eu égard aux déplacements qui peuvent avoir lieu horizontalement, 1° il est toujours nécessaire que les pièces de chaque ferme soient assujetties les unes aux autres à leurs extrémités ; 2° si les pièces des fermes aboutissant contre les points d'appui ne sont point attachées à ces points, il est nécessaire que les fermes soient assemblées par des pièces dirigées diagonalement; 3° quand les pièces aboutissant aux points d'appui sont attachées à ces points (comme cela a lieu dans les ponts de fer), les pièces dirigées diagonalement ne sont point nécessaires. Ce dernier principe est appuyé par l'exemple de plusieurs grandes constructions, et notamment par celui du pont d'Austerlitz à Paris, où il n'a point été employé de contrevents, sans qu'il en soit résulté aucun inconvénient.

Il reste à indiquer la manière dont on doit se rendre compte des efforts supportés par les diverses parties de la construction, afin de perfectionner leur résistance à ces effets. Quant aux systèmes indiqués par les *fig.* 106, 107, 108 et 109, on y appliquera sans difficulté les principes et la marche indiqués, en considérant le système comme un assemblage de verges inflexibles, unies par autant de charnières qu'il y a de points où les pièces s'assemblent entre elles, on déterminera les efforts exercés sur chaque verge.

Proportionnant ensuite la résistance de chaque pièce à ces efforts, on procurera ainsi au système une résistance, laquelle devra être considérée comme une limite au-dessus de laquelle la véritable résistance de ce système se trouvera très-probablement placée.

A l'égard des systèmes où l'on emploie une pièce courbe en bois ou en fer, formée par l'assemblage de plusieurs morceaux, l'évaluation de la résistance dont les parties de cette pièce doivent être capables, comporte des considérations spéciales. Regardant en premier lieu cette pièce comme une portion de voûte, et déterminant la pression horizontale qui s'exerce au point C (*fig.* 110 et 111) et les pressions qui s'exercent aux points A, B dans le sens de la tangente à la courbe en ces points, on aura des efforts qui au point C sont supportés entièrement par la pièce supérieure de l'arc en bois ou du voussoir en fer, et qui aux points A, B sont supportés entièrement par la pièce inférieure. Dans les intervalles AC ou BC, les pressions exercées dans le sens de la voûte sont réparties d'une manière plus ou moins inégale sur les pièces supérieures et inférieures. Ainsi la pièce supérieure en C et la pièce inférieure en A ou B doivent être capables de résister seules aux pressions qui s'exercent en ces points. Si d'ailleurs les pièces supérieures et inférieures ont des dimensions égales dans toute l'étendue de la portion de voûte, il est certain qu'é-

tant capables de résister en C et en A, B, elles le seront à plus forte raison de résister en tout autre point.

Considérant ensuite la pièce courbe comme un solide élastique, qui doit offrir une certaine résistance à la flexion, ce qui est nécessaire pour que l'équilibre soit stable, il faudra, en ayant égard tant aux charges permanentes qu'aux charges accidentelles que l'arc doit supporter, évaluer la résistance qu'il doit offrir, c'est-à-dire trouver la valeur de la constante qui devra convenir à la pièce courbe dont il s'agit; on vérifiera ensuite si la pièce courbe offre effectivement le moment d'élasticité nécessaire. Sur quoi on peut remarquer que pour une construction en fer, la considération des pressions qui ont lieu dans la pièce courbe paraît propre à fixer les dimensions des arcs des voussoirs; tandis que la considération de l'élasticité que cette pièce doit offrir, servirait à fixer l'écartement de ces arcs ou la hauteur verticale de la pièce.

Dans les applications à la pratique des considérations précédentes, il faudra observer que les ponts de charpente sont placés dans des circonstances différentes de celles qui ont lieu pour les combles:

1°. Les matériaux sont exposés par l'effet des variations atmosphériques à une altération rapide;

2°. Le passage des voitures cause des chocs dont les effets sont autres que ceux des charges immobiles et permanentes.

La première circonstance doit engager à donner aux bois des dimensions plus fortes que celles qui leur procureraient une résistance suffisante.

Quant à la seconde circonstance, on peut établir un principe général, lequel consiste en ce que les effets d'un choc, pour altérer une construction, c'est-à-dire pour y produire des mouvements dont il résulte des pièces rompues ou usées par frottement, sont nécessairement proportionnels à la différence des forces vives possédées par le corps qui choque avant et après le choc.

HYDRAULIQUE.

THÉORIE DU MOUVEMENT DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES.

La recherche des lois du mouvement des fluides comprend diverses questions : nous considérerons principalement les cas où un fluide s'écoule hors d'un vase par un orifice, et ceux où il se meut dans un tuyau de conduite ou dans un canal découvert.

Du mouvement permanent des fluides. — On distingue le mouvement permanent et le mouvement varié. Dans le mouvement permanent, les hauteurs des niveaux, les aires des sections transversales des masses fluides, et les vitesses, en chacune de leurs parties, sont toujours les mêmes. Dans le mouvement varié, au contraire, les niveaux changent de hauteurs respectives, les aires des sections augmentent ou diminuent, et les vitesses cessent d'être constantes.

Continuité des fluides. — Une condition fondamentale du mouvement des fluides, qui doit être satisfaite pour qu'il soit possible d'en calculer les circonstances, c'est la continuité des fluides. On entend par là que les molécules qui composent la masse fluide sont contiguës les unes aux autres sans lacune, sans intervalle. De là résulte, pour les liquides dont le volume ne varie pas sensiblement sous les pressions auxquelles ils sont ordinairement soumis, que ce volume écoulé restant partout le même, quand le mouvement est permanent, il passe dans chaque section, dans chaque tranche, le même volume de fluide à chaque instant.

De l'écoulement des liquides par des orifices. — Les parois des vases qui contiennent des liquides supportent généralement deux pressions : celle qui s'exerce du dedans au dehors et que repousse la paroi, puis celle qui s'exerce du dehors au dedans et qui tend à l'enfoncer (*fig.* 1, *Pl. XII*). La première résulte des pressions de la colonne liquide qui s'élève au-dessus du point de la paroi que l'on considère, et du poids que cette colonne peut supporter à son sommet; la seconde est la pression atmosphérique, c'est-à-dire la pression du milieu qui enveloppe le vase. Si l'on perce une ouverture dans la paroi du vase, le liquide ne s'écoulera qu'à la condition que la pression intérieure qui tend à produire l'écoulement, soit plus grande que la pression extérieure qui tend à l'empêcher. La nécessité de cette condition est évidente d'elle-même; mais elle se démontre par l'expérience.

Hypothèse du parallélisme des tranches. — Pour déterminer les lois mathématiques de l'écoulement des fluides, on admet en général l'hypothèse du parallélisme des tranches. On conçoit un orifice à mince paroi (*fig.* 2, *Pl. XII*), horizontal ou latéral, mais qui soit très-petit par rapport aux dimensions du vase, et l'on admet que, pendant l'écoulement, toutes les molécules liquides qui composent une tranche horizontale très-mince sont animées de la même vitesse; qu'elles

descendent ensemble, sans se quitter, se moulant en quelque sorte sur les diverses sections du vase pour former une tranche plus mince ou plus épaisse, suivant que la section où elles passent est plus large ou plus étroite. D'après cette hypothèse, on calcule la vitesse que doivent prendre les molécules en passant par l'orifice. M. Cauchy admet l'hypothèse de *la permanence des filets fluides;* il suppose que la régularité de l'écoulement étant établie, toutes les molécules qui partent du même point du niveau doivent décrire la même courbe pour arriver à l'orifice, et qu'en passant aux mêmes points, elles ont toujours la même vitesse.

Dans tous les cas, le niveau supérieur étant variable, la pression qui s'exerce à l'orifice est elle-même variable et produit des vitesses différentes.

L'écoulement le plus simple que l'on puisse considérer est celui qui s'établit sous une pression constante.

Nous indiquerons seulement trois moyens généraux de produire des pressions constantes : 1° *par le trop-plein;* 2° *par le flotteur de M. Prony;* 3° *par le vase de Mariotte.*

Du trop-plein. — Le trop-plein peut s'obtenir de diverses manières; la plus simple et la plus exacte est la suivante : *r* (*fig.* 3, *Pl XII*) est un réservoir; *s* une soupape qui se lève plus ou moins; *t* un tube; *ee'* une caisse et *o* l'ouverture par laquelle le liquide s'écoule. On donne de l'eau par la soupape *s* autant qu'il s'en écoule par l'ouverture *o;* le niveau se maintient exactement à la hauteur *nn';* le tube *t* et la caisse *ee'* sont destinés à empêcher l'agitation que pourrait produire l'eau par sa chute; car les plus faibles mouvements, même à la surface supérieure, peuvent avoir une influence sur la dépense.

Flotteur de M. Prony. — ABCD (*fig.* 4 et 5, *Pl. XII*) est une grande cuve rectangulaire divisée en trois compartiments par les deux petites cloisons *ee'*; le niveau de l'eau passe au-dessus de ces cloisons; F et F sont les deux vases composant le flotteur; ils plongent chacun dans l'un des compartiments extrêmes et servent à faire passer l'eau dans le compartiment moyen qui fournit à l'écoulement; *ll* est une grande plaque de métal dans laquelle s'ajustent les orifices et les ajutages par lesquels on veut faire passer le liquide : elle est vue de face (*fig.* 4) et de profil (*fig.* 5).

Les vases F, F du flotteur sont en feuilles de cuivre très-minces; leurs parois sont renforcées par de petites tringles de fer *t*, qui viennent s'adapter aux grandes tringles T : celles-ci forment un rectangle supporté par le flotteur et soutenant lui-même un vase V, qui est disposé au-dessous de la cuve, et un entonnoir *cr* destiné à conduire dans le vase les produits de l'écoulement. L'équilibre étant établi, si l'on enlevait 10 kilogrammes d'eau dans l'intérieur de la cuve, le niveau baisserait d'une certaine quantité : mais le même poids de 10 kilogrammes placé dans le flotteur, soit en haut dans les vases F, F, soit en bas dans le vase V, ramènerait le niveau exactement au même point; car le flotteur, devenu plus pesant de 10 kilogrammes, déplacerait de plus 10 kilogrammes d'eau et produirait donc, en s'enfonçant, le même effet que si l'on avait remis dans la cuve les 10 kilogrammes d'eau que l'on en avait ôtés. Pour avoir le même niveau

pendant l'écoulement, tout se réduit donc à charger le flotteur à chaque instant d'un poids égal au poids de l'eau qui coule par l'orifice. C'est là précisément ce que fait l'entonnoir *er*, en conduisant dans le vase V toute l'eau qui sort de la cuve. Il est vrai que le liquide qui est en chemin entre l'orifice et l'entonnoir n'exerce pas encore sa pression pour rétablir le niveau; mais il est facile de tenir compte de la différence.

Vase de Mariotte. — Cet appareil est représenté (*fig.* 6, *Pl. XII*, 7 et 8, *Pl. XIII*). *t* est un tube qui peut glisser dans le bouchon de la tubulure *b* et dont l'extrémité inférieure est successivement, ou abaissée au point *p* au-dessous du niveau *nv* de l'ouverture latérale, ou relevée au point *h* au-dessus du même niveau. L'ouverture latérale est assez étroite pour que la colonne liquide ne puisse pas se diviser. Le tube étant en *p* (*fig.* 6), et complétement rempli d'eau ainsi que le flacon, il est clair que le liquide doit s'écouler par l'orifice latéral *v*; car la pression intérieure se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube et de la pression due au poids de la colonne liquide *sn*, tandis que la pression extérieure n'est que la pression atmosphérique. Le liquide jaillit en effet, et le niveau tombe rapidement dans l'intérieur du tube depuis le point *s* au point *n*; là il s'arrête, et tout écoulement cesse. Le vase reste plein, l'orifice *v* reste ouvert, et cependant pas une goutte de liquide ne s'échappe. Sur toute l'étendue de la couche horizontale *n'nv* la pression étant la même qu'au point *n*, c'est-à-dire une pression atmosphérique, il n'y a plus de raison pour que le liquide s'écoule. Sur une autre couche, telle que *c'c*, la pression n'est pas due seulement au poids de la colonne supérieure, mais elle est égale à une pression atmosphérique diminuée de la colonne *c'n'*. Que l'on fasse maintenant glisser le tube pour le remonter jusqu'au point *h* (*fig.* 7); à l'instant même l'écoulement recommence, des bulles d'air se forment à l'extrémité inférieure du tube, se gonflent, se détachent et montent à la file dans la partie supérieure du vase. L'écoulement continue de la sorte avec une vitesse constante pendant tout le temps que le niveau du liquide descend depuis le sommet du vase jusqu'en *h*; car la pression sur la couche *n'nv* se compose alors de la pression atmosphérique qui s'exerce en *h*, et de la pression qui est due au poids de la colonne *hn*, pressions qui restent l'une et l'autre constantes, aussi longtemps que le niveau n'est pas tombé jusqu'en *h*; à partir de cet instant, la vitesse d'écoulement diminue de plus en plus jusqu'à devenir tout à fait nulle quand le niveau est arrivé au point *n*.

Le vase de Mariotte peut être représenté sous une grande variété de formes, soit avec un orifice latéral pour l'écoulement, soit avec un orifice horizontal comme l'indique la *fig.* 8.

THÉORÈME DE TORICELLI.

Théorie de l'écoulement de l'eau d'un vase constamment plein. — Considérons un vase constamment plein, à contours continus, arrondis, laissant couler l'eau par un orifice *ab* (*fig.* 9, *Pl. XIII*) tellement raccordé avec les parois, qu'on puisse regarder les vitesses comme égales et parallèles entre elles à cet orifice, ainsi que dans toutes les autres sections du vase.

Soient

AB = O la surface de la tranche supérieure;
U la vitesse des filets qui traversent cette tranche;
A l'aire de l'orifice *ab*;
V la vitesse des filets qui y passent.

Le mouvement étant arrivé à l'état de permanence, les volumes OUt et AVt, correspondant à l'élément du temps, seront égaux : on a donc

$$OU = AV.$$

Le poids de ce volume d'eau écoulée dans l'élément de temps sera

$$1000\,OUt = 1000\,AVt.$$

H étant la hauteur de la section AB au-dessous de *ab*, le travail développé par la pesanteur sur cette quantité de fluide sera 1000 AVtH. En effet, dans le déplacement du volume AB*ab* parvenu en A'B'*a'b'*, il y a une masse intermédiaire A'B'*a'b'* qui a remplacé celle qui occupait le même espace et qui est du même poids; donc le travail total de la pesanteur se réduit à celle qui correspond à la descente de la tranche ABA'B' en *aba'b'*.

Si les surfaces AB et *ab* sont soumises à des pressions P et p par unité de surface, les pressions totales sur ces sections sont PO et pA, et les chemins parcourus dans le sens de ces pressions étant Ut et Vt, le travail de ces pressions qui agissent en sens contraire l'une de l'autre sera

$$POUt - pAVt = (P-p)AVt;$$

à cause de OU = AV, la masse de la tranche ABA'B' est

$$\frac{1000\,OUt}{g},$$

et sa force vive

$$\frac{1000\,OUt}{g}U^2,$$

celle de la tranche *aba'b'* est

$$\frac{1000\,AVt}{g}V^2,$$

et, comme dans le mouvement de la masse AB*ab* en A'B'*a'b'*, il y a une partie qui, pour les deux positions, a la même force vive, il s'ensuit que la variation de force vive est

$$\frac{1000\,AVt}{g}V^2 - \frac{1000\,OUt}{g}U^2 = \frac{1000\,AVt}{g}(V^2-U^2).$$

Appliquant donc à ce mouvement le principe des forces vives, nous aurons la relation

$$\frac{1000\,AVt}{2g}(V^2-U^2) = 1000\,AVtH + (P-p)AVt.$$

S'il s'agissait d'un autre fluide dont le mètre cube eût un poids d, on aurait de même

$$\frac{dAVt}{2g}(V^2-U^2) = dAVtH + (P-p)AVt.$$

En divisant tout par $dAVt$ et multipliant par $2g$, il vient

$$V^2 - U^2 = 2gH + \frac{2g(P-p)}{d}.$$

Or on a

$$AV = OU, \quad \text{d'où} \quad U = \frac{A}{O}V \quad \text{et} \quad V^2 - U^2 = \left(1 - \frac{A^2}{O^2}\right)V^2,$$

ce qui donne

$$V = \sqrt{\frac{2gH + \frac{2g(P-p)}{d}}{1 - \frac{A^2}{O^2}}}.$$

Dans la plupart des applications, l'aire A de l'orifice est assez petite, par rapport à celle de la section du réservoir, pour que le rapport $\frac{A^2}{O^2}$ puisse être négligé vis-à-vis de l'unité. En effet, si $A = \frac{1}{10}O$, $\frac{A^2}{O^2} = \frac{1}{100}$, la formule qui donne la vitesse devient alors

$$V = \sqrt{2gH + \frac{2g(P-p)}{d}}.$$

Lorsqu'il s'agit de l'écoulement de l'eau, les pressions P et p sont celles de l'atmosphère et sensiblement les mêmes; alors la formule qui donne la vitesse se réduit à

$$V = \sqrt{2gH};$$

ce qui exprime que la vitesse d'écoulement est celle qui est due à la hauteur H, ou, en d'autres termes, que les molécules, en sortant de l'orifice, ont la même vitesse que si elles fussent tombées librement dans le vide, d'une hauteur égale à la hauteur du niveau au-dessus du centre de l'orifice.

Ier COROLLAIRE. — *La vitesse d'écoulement ne dépend que de la profondeur de l'orifice au-dessous du niveau et nullement de la nature du liquide.* — En effet, tous les corps, en tombant de la même hauteur dans le vide, acquièrent la même vitesse. Ainsi le mercure et l'eau prennent la même vitesse, lorsqu'ils s'écoulent par des orifices qui sont à la même profondeur au-dessous du niveau; cependant le mercure est poussé par une pression bien plus grande que l'eau. La profondeur de l'orifice étant, par exemple, de 32 pieds, l'eau ne serait poussée que par la pression d'une atmosphère, tandis que le mercure serait poussé par une pression de treize atmosphères et demie.

IIe COROLLAIRE. — *Pour un même liquide, les vitesses d'écoulement sont comme les racines carrées des profondeurs des orifices au-dessous du niveau.* — En effet, les vitesses des corps pesants sont entre elles comme les racines carrées des hauteurs d'où ils sont tombés. Ainsi, dans un vase qui aurait, par exemple, 100 pieds de hauteur, si l'on perçait deux orifices, l'un à 1 pied de profondeur et l'autre sur le fond, à 100 pieds de profondeur, la vitesse du liquide sortant par le dernier serait seulement dix fois plus grande que

la vitesse du liquide sortant par le premier; cependant la seconde pression serait cent fois plus grande que la première.

III[e] Corollaire. — Si la pression qui s'exerce au sommet de la colonne liquide était plus grande que la pression extérieure qui s'oppose à l'écoulement, cet excès de pression serait équivalent au poids d'une colonne de même liquide d'une certaine hauteur, et alors la vitesse des molécules qui s'écoulent serait la même que si elles fussent tombées du sommet de cette seconde colonne, qu'il faut concevoir comme ajoutée au-dessus de la première. Ce serait le contraire si la pression extérieure était plus grande que la pression qui s'exerce au-dessus du liquide.

DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

Pour les fluides élastiques, l'écoulement est dû à la différence des pressions P et p, et la hauteur H du réservoir au-dessus de l'orifice est toujours assez faible pour pouvoir être négligée par rapport aux termes $\frac{P}{d}$ et $\frac{p}{d}$ dont la différence représente une hauteur du fluide bien plus considérable; la formule sera donc alors

$$V = \sqrt{\frac{2g(P-p)}{d}},$$

dans laquelle d est le poids du mètre cube de fluide à la pression P.

On sait que les pressions des gaz ou vapeurs se mesurent par le poids d'une colonne de liquide qui leur fait équilibre; si, par exemple, on emploie un manomètre à mercure, et que H' soit la hauteur de la colonne qui fait équilibre à la pression P, on a

$$P = 13598\,H';$$

de même, si la pression P du gaz que l'on considère était mesurée par une colonne du même gaz, en nommant H_1 la hauteur de cette colonne, on aurait

$$P = dH_1,$$

d'où

$$H_1 = \frac{P}{d}.$$

Ainsi, dans la formule ci-dessus, on voit que les fractions $\frac{P}{d}$ et $\frac{p}{d}$ sont les hauteurs des colonnes de gaz à la densité d, capables de produire les pressions P et p.

On voit donc que la formule qui donne la vitesse d'écoulement du gaz est de la même forme que celle qui est relative aux liquides; elle suppose la densité d constante ou le fluide incompressible. D'après cela, tout ce qu'on dira de l'écoulement de l'eau s'appliquera au mouvement des gaz, à quelque différence près.

La vitesse théorique d'écoulement par l'orifice étant $V = \sqrt{2gH}$, et l'aire de l'orifice étant A, la dépense théorique en une seconde a pour expression

$$AV = A\sqrt{2gH}.$$

Cas où l'orifice est noyé. — Si le liquide s'écoule d'un vase où la hauteur du niveau au-dessus de l'orifice soit H, dans un autre vase ou réservoir où la hauteur du niveau au-dessus de l'orifice soit H′, la pression exercée du côté d'amont par unité de surface sera 1000 H, et celle exercée du côté d'aval sera 1000 H′; par conséquent la différence des pressions sera 1000 (H — H′), ou, en d'autres termes, la hauteur dont le volume écoulé aura descendu sera H — H′, par conséquent la vitesse théorique d'écoulement sera

$$V = \sqrt{2g\,(H - H')},$$

et dans le cas actuel, où l'on dit que l'orifice est noyé, la dépense théorique sera

$$A\sqrt{2g\,(H - H')}.$$

CONTRACTION DE LA VEINE FLUIDE.

Supposons que le liquide jaillisse d'un vase par un orifice circulaire percé en mince paroi. La veine fluide sera verticale ou parabolique, suivant que l'ouverture sera faite au fond du vase ou sur sa paroi latérale; dans les deux cas elle se moule, en quelque sorte, sur la forme de l'orifice, et elle s'étend à une assez grande distance avant de se diviser et de s'éparpiller en gouttes. Entre la paroi et le point où elle se divise, la veine fluide prend une surface polie et une forme permanente; malgré le mouvement rapide des molécules qui se succèdent incessamment, elle offre l'apparence d'une veine de cristal qui serait parfaitement immobile. L'orifice ayant, par exemple, un centimètre de diamètre, la section de la veine est d'un centimètre à son origine, mais à quelques millimètres de distance la section diminue, et elle diminue de plus en plus, sans cesser d'être circulaire, jusqu'à une certaine limite, où se trouve ce que l'on appelle la *section contractée;* passé ce point, la section augmente de nouveau, jusqu'à l'instant où la veine se divise par l'accélération de la pesanteur et par la présence de l'air. Dans les *fig.* 10 et 11, *Pl. XIII*, *ss′* est la section contractée.

L'écoulement qui se fait par de grandes ouvertures présente aussi le phénomène de la contraction de la veine, mais sur une autre échelle et avec d'autres circonstances extrêmement remarquables. Pour en donner une idée, nous citerons ici, sur les veines carrées, quelques observations qui sont dues à MM. Poncelet et Lesbros, officiers supérieurs du génie; ces observations sont tirées d'un immense travail qui a été exécuté par ces deux habiles ingénieurs, et dans lesquels on trouve une foule d'expériences du plus grand intérêt, parce qu'elles ont été dirigées et décrites avec une précision qui ne laisse rien à désirer.

Dans l'une de ces expériences, la veine sort par un orifice vertical, percé en mince paroi, de forme carrée, ayant 20 centimètres de côté, sous une charge de $1^{m},68$, prise au-dessus de la base de l'orifice.

Les résultats en sont représentés dans les *fig.* 12, 13, 14 et 15, *Pl. XIII*. La *fig.* 12 est la section de l'orifice, et les *fig.* 13, 14 et 15 représentent les sections de la veine par des plans verticaux parallèles

à l'orifice, et pour des distances qui sont respectivement de 20, 30 et 40 centimètres.

La lettre H indique partout la partie supérieure de la veine. En comparant d'abord la *fig.* 12 à la *fig.* 15, on reconnaît le phénomène de *l'inversion de la veine;* c'est-à-dire que vis-à-vis les angles de l'orifice sont les milieux des côtés de la veine, et réciproquement vis-à-vis les angles de la veine sont les milieux des côtés de l'orifice. Cette inversion n'est pas subite; elle se fait par degrés, comme on peut le voir sur les *fig.* 13 et 14 qui représentent les sections faites à 20 et à 30 centimètres. A une petite distance de l'orifice, les angles du carré disparaissent et sont remplacés par des petites facettes sensiblement planes, tandis que les côtés du carré s'infléchissent en dedans et paraissent un peu concaves lorsqu'on les regarde du dehors. A mesure que la veine s'éloigne de l'orifice, les facettes s'élargissent de plus en plus et se creusent à leur tour, tandis que les côtés diminuent; de telle sorte qu'à 20 centimètres de distance (*fig.* 13) la section de la veine est octogonale : ses huit côtés sont presque égaux et également infléchis vers le centre; seulement on remarque en B, à la partie inférieure, une irrégularité singulière : c'est une arête saillante de rebroussement vers le milieu du côté. Au delà de 20 centimètres ces effets continuent dans le même sens, et à 30 centimètres (*fig.* 14) les faces correspondantes aux côtés de l'orifice ont disparu complétement, celle d'en haut et celle d'en bas se sont arrondies, tandis que les deux latérales se sont creusées d'une manière assez bizarre. Enfin, à 40 centimètres toutes les arêtes de rebroussement s'effacent, et la section de la veine n'a plus que quatre côtés un peu courbés en dedans et sensiblement égaux. Cette figure se conserve au delà de 40 centimètres, seulement les faces se creusent davantage et les pointes deviennent plus saillantes.

Le maximum de contraction, ou plutôt la section contractée, se trouve à 30 centimètres; c'est la section de la *fig.* 14. Sa surface est seulement les 0,56 de celle de l'orifice; c'est-à-dire que pour cette veine *le coefficient de contraction est* 0,56.

Quand les orifices ne sont pas circulaires, les points de la surface de la veine qui sont les plus rapprochés de l'axe et qui forment, à proprement parler, la section contractée, se trouvent en général sur une courbe à double courbure.

Coefficient de contraction. — On s'accorde généralement à conclure que le rapport qui existe entre la section contractée et la section de l'orifice, lorsque celui-ci a seulement quelques centimètres de côté est compris entre 0,6 et 0,7; c'est-à-dire qu'à son minimum la section de la veine n'est plus que les 6 dixièmes ou les 7 dixièmes, ou environ les $\frac{2}{3}$ de la surface de l'ouverture. C'est ce rapport que l'on appelle le *coefficient de contraction.*

La distance de la section contractée à la face intérieure de la paroi est, en général, un peu plus grande que le rayon de l'orifice, quand l'orifice est petit; mais pour des ouvertures plus grandes, la section contractée paraît s'éloigner davantage.

Ces résultats sont à peu près indépendants de la forme de l'orifice

et de la pression sous laquelle le liquide s'écoule. Seulement, pour des orifices dont le diamètre est moindre qu'un centimètre, la contraction est moindre que 0,7 ; ce qui tient sans doute à ce que l'épaisseur des parois devient alors sensible et produit un effet analogue à l'effet des ajutages dont nous parlerons plus loin.

Lorsque la pression qui s'exerce au-dessus d'un orifice horizontal est très-faible, il se fait une contraction d'une autre espèce (*fig.* 16, *Pl. XIII*); le liquide remplit encore l'orifice, mais il glisse des parois vers le centre pour former un filet qui est quelquefois très-petit. C'est ce que M. Hachette appelle une *veine secondaire*.

La contraction de la veine résulte de la convergence des divers filets fluides qui la composent. Si toutes les molécules se présentaient à l'orifice avec des vitesses parallèles à l'axe de la veine, il n'y aurait point de contraction, parce qu'il n'y aurait point de raison pour qu'elles fussent déviées de la ligne directe de leur mouvement; mais le liquide, appelé par l'écoulement et poussé par la pression, se précipitant vers l'orifice, dans toutes les directions possibles, il faut bien que la convergence de ces vitesses se manifeste au dehors par un rétrécissement. Cette cause de la contraction ne peut être qu'indiquée; le calcul ne saurait y atteindre.

La division de la veine, à une certaine distance de l'orifice, n'est pas seulement produite par la présence de l'air: elle a lieu dans le vide, et elle résulte de l'accélération due à la pesanteur. Deux molécules qu'on laisserait tomber du même point, à une seconde d'intervalle, seraient, au point de départ, à 15 pieds l'une de l'autre; mais après trois secondes elles seraient à 65 pieds de distance, et après une minute elles seraient à 1785 pieds : c'est là précisément ce qui arrive aux différentes parties du liquide qui composent la veine. Deux molécules se suivent en passant par l'orifice, et, après un certain temps, la première prend une avance sensible sur la seconde.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DES LOIS DE L'ÉCOULEMENT.

Pour vérifier la première loi, ou le théorème de Toricelli, on adapte à la plaque (*fig.* 4 et 5, *Pl. XII*) un orifice en mince paroi, d'une grandeur connue, d'un centimètre, par exemple; on mesure la hauteur du niveau au-dessus de son centre et l'on observe *la dépense* pendant un temps très-exactement déterminé. Cette dépense étant connue et évaluée en litres, il est très-facile d'en déduire le nombre L des litres qui se sont écoulés en 1 seconde ; alors on peut considérer ce volume comme un cylindre qui est passé par l'orifice, à peu près comme un fil passe à la filière, et dont la base est, par conséquent, la surface S de la veine contractée, tandis que sa longueur est l'espace parcouru en 1 seconde, c'est-à-dire la vitesse V de l'écoulement, d'où l'on déduit

$$L = SV \quad \text{ou} \quad V = \frac{L}{S},$$

c'est la vitesse expérimentale ou la vitesse effective.

D'une autre part, la vitesse théorique donnée par le théorème

est

$$V = \sqrt{2gH},$$

H étant la hauteur du niveau au-dessus du centre de l'orifice.

C'est de l'égalité de ces deux vitesses que dépend la vérité du théorème de Toricelli. Comme il est très-difficile de mesurer directement le diamètre de la veine contractée, pour en déduire sa surface S, on trouve en général de petites différences; tantôt la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, tantôt elle est plus petite; mais pour les petits orifices, les deux résultats sont si voisins, qu'il suffit d'augmenter ou de diminuer un peu la valeur de S pour les rendre tout à fait identiques. C'est même de cette manière que l'on a déterminé la valeur de la contraction de la veine. Ainsi, dans ce cas, le théorème de Toricelli paraît vrai; il donne la vitesse des molécules liquides qui s'écoulent, mais seulement la vitesse dont elles sont animées à l'instant où elles traversent la section contractée; avant et après cet instant elles ont une moindre vitesse, puisque la section de la veine offre une plus grande surface. Pour les grands orifices, MM. Poncelet et Lesbros ayant mesuré avec une grande précision, et la section contractée et la dépense dans un temps donné, il leur a été facile d'en déduire rigoureusement la vitesse effective, et leurs résultats prouvent que, dans ce cas, le théorème de Toricelli ne donne pas exactement la vitesse du liquide dans la section contractée.

DES MOYENS A EMPLOYER POUR TENIR COMPTE DES EFFETS DE LA CONTRACTION.

La mesure directe de l'aire de la section où la veine fluide est le plus fortement contractée a été faite dans plusieurs cas, et en particulier pour des orifices circulaires de $0^m,03$ à $0^m,08$ de diamètre où le liquide affluait de toutes parts et pour lesquels on a trouvé que l'aire de cette section contractée n'était que les 0,64 de celle de l'orifice.

Ce rapport n'est pas constant, et dépend de la forme des orifices, de leur proportion, de leur disposition et de la charge d'eau; et comme d'ailleurs la vitesse éprouve aussi quelque diminution, il s'ensuit que les effets de la contraction sur la dépense ne peuvent être appréciés par la seule mesure de l'aire de la section contractée.

Le moyen le plus sûr de tenir compte de ces effets si variés, c'est de comparer la dépense effective à la dépense théorique pour tous les cas de la pratique, et de déterminer le rapport de ces deux dépenses.

Ce rapport, que l'on nomme le *multiplicateur* ou le *coefficient de la dépense théorique*, a été aussi déterminé par MM. Poncelet et Lesbros, avec des moyens d'une très-grande précision.

DES AJUTAGES ET DE LEUR INFLUENCE SUR L'ÉCOULEMENT.

On appelle *ajutages*, des tuyaux de diverses forces, ou des plaques courbes, percées de diverses manières qui s'ajustent aux orifices en minces parois pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Le plus simple des ajutages est celui qui a la forme exacte que prend la veine depuis l'orifice jusqu'à la section contractée. Lorsqu'il

est travaillé avec soin et que sa surface intérieure est bien polie, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

Une paroi courbe, percée d'un orifice, ne donne pas la même dépense qu'une paroi plane, percée d'un orifice de même grandeur : elle donne une dépense plus grande quand sa concavité est tournée vers l'intérieur (*fig.* 17, *Pl. XIII*) et une dépense moindre quand elle est tournée vers l'extérieur (*fig.* 18, *Pl. XIII.*)

Ajutages cylindriques. — Dans les ajutages cylindriques de même diamètre que les orifices en minces parois auxquels ils sont appliqués, il se produit un phénomène singulier : tantôt la veine fluide reste *libre* et passe dans l'ajutage sans le toucher, tantôt elle devient *adhérente* et l'écoulement se fait à *gueule bée*, c'est-à-dire à plein tuyau. Dans le premier cas, la présence de l'ajutage n'a d'influence ni sur la vitesse ni sur la dépense; il ne peut produire aucun effet, puisqu'il n'a aucun point de contact avec le liquide. Dans le second cas, l'adhérence qui s'établit entre la surface de la veine et les parois de l'ajutage détermine une augmentation de vitesse et une augmentation de dépense. La dépense du premier cas est à celle du second comme 100 est à 133, pourvu toutefois que le diamètre de l'ajutage soit à peu près le quart de sa longueur. Ce phénomène dépend de plusieurs causes, et surtout de la pression : sous de faibles charges, la veine est toujours adhérente, même pour les ajutages très-courts; sous de grandes pressions, la veine reste libre; et sous des pressions intermédiaires on peut à volonté produire l'écoulement à veine libre ou à veine adhérente : il suffit d'un léger obstacle pour établir l'adhérence, et il suffit quelquefois du moindre choc pour que la veine se détache des parois de l'ajutage et coule librement.

Quand l'adhérence est établie, la veine fluide se contracte dans l'ajutage, comme elle ferait à l'air libre (*fig.* 19, *Pl. XIII*); on peut s'en assurer en faisant l'expérience avec un tube de verre, et l'on peut s'en assurer encore en donnant à l'ajutage la forme elle-même de la veine contractée (*fig.* 20, *Pl. XIII*) : avec ce rétrécissement, la dépense est encore 133 comme elle était auparavant.

Ajutage conique. — Un ajutage conique peut donner une dépense encore plus grande que l'ajutage cylindrique : il paraît que l'on obtient la plus grande dépense possible en prenant deux troncs de cône opposés (*fig.* 21, *Pl. XIII*), de telle sorte que *vv'*, *ss'* prenne exactement la forme de la veine, que *mn* égale trois fois *om*, et que TT' soit les $\frac{17}{8}$ de *ss'*. Alors la dépense de l'orifice étant représentée par 100, celle de l'ajutage s'élève à peu près à 150.

S'il y a des ajutages qui augmentent la dépense, il est très-facile d'en construire aussi qui le diminuent dans un très-grand rapport. Tout renflement dans un ajutage conique ou cylindrique produit une diminution de vitesse; les *réflexions*, les *remous*, les chocs des molécules animées de mouvements contraires, produisent une grande complication de phénomènes, et en dernier résultat une grande diminution dans la dépense. Les varices peuvent être assimilées à des renflements

de cette espèce, et s'il est difficile d'analyser leur influence complète sur les phénomènes de la vie, il est du moins permis de conclure que dans tous les cas elles retardent la vitesse de la circulation.

L'emploi des ajutages divers pouvant augmenter ou diminuer la dépense, il importe beaucoup de tenir compte de ses influences dans les concessions ou distributions d'eau. Les Romains en avaient reconnu la nécessité pour prévenir les abus, et une loi réglait la forme des ajutages que l'on pouvait adapter aux prises d'eau particulières.

DES JETS D'EAU.

Il y a des jets d'eau qui s'élèvent verticalement de bas en haut, et il y en a d'autres qui s'élèvent en gerbes, suivant des paraboles de diverses amplitudes. Les orifices qui donnent naissance aux jets verticaux sont percés dans des parois horizontales, et ceux qui donnent naissance aux jets paraboliques sont percés dans des parois diversement inclinées. Dans tous les cas, la direction du jet est produite par la pesanteur, qui est toujours verticale, et par la pression ou la force impulsive qui est toujours perpendiculaire à la paroi. D'après le théorème de Toricelli, les molécules liquides ayant à l'orifice la même vitesse que si elles fussent tombées d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir, on voit que cette vitesse, dirigée de bas en haut, serait précisément capable de faire remonter toutes les molécules jusqu'à la hauteur de ce niveau, d'où elles sont censées descendues. Ainsi la hauteur du jet vertical serait toujours égale à l'élévation du niveau au-dessus de l'orifice. Mais il y a plusieurs causes qui empêchent les eaux jaillissantes d'atteindre à cette hauteur théorique; elles éprouvent des frottements contre les parois des tuyaux qui les amènent depuis le réservoir jusqu'à l'orifice et contre l'orifice lui-même dont elles rasent les parois avec une grande vitesse; elles éprouvent la résistance de l'air atmosphérique, et enfin les eaux qui retombent du point le plus élevé du jet retombent sur les eaux ascendantes et leur enlèvent du mouvement. Pour réduire toutes ces résistances à leurs moindres valeurs, on a coutume de suivre dans la pratique les règles suivantes :

1°. On donne aux tuyaux de conduite un diamètre qui dépend de leurs longueurs, de la grandeur de l'orifice et de la hauteur du réservoir. Le diamètre pourra être calculé par les formules que nous donnerons sur les tuyaux de conduite. On s'arrange pour que la vitesse de l'eau dans les tuyaux soit tout au plus de 2 à 3 décimètres par seconde.

2°. On fait l'orifice circulaire et on le perce en mince paroi dans une plaque que l'on appelle *la platine ;* quand on peut se dispenser de recourber le tuyau, la platine est ajustée vers son extrémité; elle forme une partie de sa paroi latérale supérieure. Quand on est forcé de recourber le tuyau, on le recourbe en haut, en l'arrondissant, et alors la platine en forme l'extrémité. La platine est plane ou courbée, en forme de calotte convexe, suivant que l'on veut avoir un jet vertical ou une gerbe à plusieurs jets paraboliques.

Tout ajutage, cylindrique ou conique, donne un jet moins élevé

que les orifices à minces parois. Ces conditions étant remplies, on admet, d'après les expériences de Mariotte, que le jet s'élève à une hauteur de 5 pieds pour une hauteur de réservoir de 5 pieds 1 pouce, et qu'en général, pour avoir la hauteur du réservoir, il faut, à la hauteur H du jet, évaluée en pieds, ajouter autant de pouces qu'il se trouve d'unités dans $\frac{H}{5}$ élevé au carré. Ainsi, un jet de 100 pieds suppose un réservoir de 100 pieds plus 400 pouces, ou enfin de 133 pieds 4 pouces.

VANNES DES ÉCLUSES.

Les vannes démasquent des orifices dont le seuil est ordinairement placé assez près des radiers, de sorte que la contraction, sur le côté inférieur, n'y est pas tout à fait aussi grande que si le radier avait été plus éloigné. L'expérience a montré que, dans ce cas, la multiplication de la dépense était $m = 0{,}625$, soit que l'écoulement eût lieu à l'air libre, soit que l'orifice fût noyé. Les orifices ont eu, dans ces expériences, des surfaces qui se sont élevées à 1 mètre, et les charges sur le centre ont été de $1^m{,}895$ à $4^m{,}436$.

Vannes inclinées. — On conçoit facilement que l'inclinaison des vannes, comme l'indique la *fig.* 22, *Pl. XIII,* doit augmenter la dépense en diminuant la contraction. Les seules expériences que l'on possède sur l'effet de l'inclinaison des vannages sont celles que M. Poncelet a exécutées sur les vannes de sa roue à aubes courbes. Il résulte de ces expériences que, quand le seuil et les côtés verticaux sont placés dans le prolongement des parois du réservoir, le multiplicateur de la dépense prend les valeurs suivantes :

Vannages inclinés	à 1 de base sur 2 de hauteur.	$m = 0{,}74$.
	à 1 de base sur 4 de hauteur.	$m = 0{,}80$.

ORIFICES ACCOMPAGNÉS D'UN COURSIER.

Au lieu de verser à l'air libre, l'orifice est souvent accompagné d'un coursier de même ou de plus grande largeur. D'après les expériences de MM. Poncelet et Lesbros, la présence d'un coursier est sans influence sensible sur la dépense, tant que les charges sur le centre des orifices ne sont pas au-dessous de

0,50 à 0,60	pour des orifices de	0,20 à 0,15 de hauteur.
0,30 à 0,40	—	0,10,
0,20	—	0,05 et au-dessous.

La plupart des orifices ordinaires sont au delà de ces limites, et par conséquent, dans presque tous les cas de la pratique, on n'aura pas à tenir compte de l'influence du coursier quant à la dépense d'eau.

ORIFICES ACCOMPAGNÉS DE BUSES PYRAMIDALES.

On rencontre dans quelques usines des orifices accompagnés de buses pyramidales en bois appelées *cannelles*. Quand l'intérieur de

ces cannelles est garni de cadres en fer ou en bois formant saillie, ils occasionnent des étranglements, des pertes de force vive; et des expériences faites par MM. Tardy et Piobert ont prouvé qu'alors le multiplicateur de la dépense était 0,864, en prenant pour orifice le dernier cadre placé à l'extrémité de la base, et pour charge la hauteur du réservoir au-dessus de ce centre, ou la différence des niveaux d'amont et d'aval, si l'orifice est noyé. Quand, au contraire, il n'y a pas de cadres intérieurs et que les parois sont continues et sans saillies, le multiplicateur est 0,964, ce qui montre l'inconvénient de toute saillie intérieure formant obstacle au mouvement de l'eau.

ORIFICES ACCOMPAGNÉS D'UN COURSIER A PAROIS VERTICALES QUI SE RAPPROCHENT.

Il existe des roues à axe vertical sur lesquelles l'eau est amenée par un coursier à fond à peu près horizontal, dont une des joues est verticale et tangente à la roue; et l'autre, aussi verticale, se rapproche de la première, de manière à rétrécir le passage et à le réduire à $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de la largeur de l'orifice. Il résulte de cette disposition qu'il se forme en aval de l'orifice des remous qui gênent plus ou moins l'écoulement. Des expériences faites par M. Piobert ont montré qu'en calculant la dépense théorique de l'orifice ouvert à l'origine de ces coursiers, le multiplicateur de la dépense variait avec la levée de la vanne, et prenait les valeurs suivantes, selon le rapport de la hauteur de l'orifice à sa largeur.

Valeurs du rapport $\frac{E}{L}$:

0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45;

Valeurs du multiplicateur :

$m =$ 0,740, 0,700, 0,660, 0,630, 0,590, 0,550, 0,520, 0,480.

ORIFICES ACCOMPAGNÉS D'UN AJUTAGE CYLINDRIQUE.

Lorsqu'un orifice circulaire est prolongé extérieurement par un tuyau ou ajutage cylindrique de même diamètre, la veine fluide, après s'être contractée, se dilate et remplit le tuyau. La section transversale de la veine augmentant, sa vitesse diminue, et à chaque instant les tranches élémentaires de fluide qui traversent la section contractée rencontrant la masse fluide qui se meut dans le tuyau avec une vitesse plus petite que la leur, il y a là un choc entre corps mous, et, par conséquent, une perte de force vive (*fig.* 23, *Pl. XIII*).

En appelant V la vitesse dans la section contractée, U la vitesse dans le tuyau au delà de cette section, il est facile de voir que le mouvement étant arrivé à l'état de permanence, la vitesse dans le tuyau ne change pas et que ce sont seulement les tranches élémentaires qui passent par la section contractée qui perdent successivement une

portion de leur vitesse égale à $V - U$. Par conséquent, chacune de ces tranches de masse m perdra, dans l'élément de temps t, la force vive $m(V-U)^2$; et comme elle conserve la force vive mU^2, il s'ensuit que la force vive totale qui est communiquée dans chaque élément de temps au fluide qui s'écoule dans cet intervalle est

$$mU^2 + m(V-U)^2.$$

Les mêmes effets se reproduisant dans les différents instants, exactement de la même manière, puisque le mouvement est arrivé à l'état de permanence, la force vive communiquée dans chaque seconde à la masse M écoulée pendant le temps est

$$MU^2 + M(V-U)^2,$$

quantité qui doit être égale au double de la quantité de travail développée par la gravité, qui est MgH, en supposant que l'écoulement ait lieu à l'air libre sous la charge H. On a donc

$$MU^2 + M(V-U)^2 = 2MgH \quad \text{ou} \quad U^2 + (V-U)^2 = 2gH;$$

mais de plus on a, en appelant A l'aire de l'orifice ou la section du tuyau, qui sont égales,

$$mAV = AU, \quad \text{d'où} \quad V = \frac{U}{m}.$$

La relation ci-dessus devient donc

$$U^2\left[1 + \left(\frac{1}{m} - 1\right)^2\right] = 2gH,$$

d'où

$$U = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \left(\frac{1}{m} - 1\right)^2}} \quad \text{ou} \quad U = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{m} - 1\right)^2}}\sqrt{2gH};$$

la dépense en 1 seconde est donc

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{m} - 1\right)^2}} A\sqrt{2gH}.$$

Il résulte de là que le multiplicateur de la dépense pour ces tuyaux additionnels se déduit de la valeur m de celui de la contraction complète pour l'orifice donné.

La formule ci-dessus fait abstraction du frottement de l'eau dans le tuyau, ce qui n'est permis que quand il est très-court, et égal à deux ou trois fois au plus le diamètre de l'orifice.

Application de ce qui précède. — On devra donc se rappeler que toutes les fois qu'un fluide sort d'un orifice avec une vitesse V, et pénètre dans une conduite ou une capacité où il ne conserve, après les tourbillonnements qui ont lieu près de l'orifice, qu'une vitesse U, la perte de force vive qui en résulte pour une masse M écoulée est

$$M(V-U)^2,$$

ce qui correspond à une perte de travail exprimée par

$$\frac{1}{2} M (V-U)^2.$$

Cette conséquence est générale et s'applique à tous les tuyaux de conduite.

CAS OU LA SECTION DU TUYAU S'ÉLARGIT AU DELA DE L'ORIFICE.

Si l'aire de la section du tuyau ou réservoir partiel était plus grande que celle de l'orifice, en la représentant par O on aurait

$$m AV = OU,$$

d'où

$$V = \frac{O}{mA} U,$$

et alors la perte de force vive produite par le passage du fluide de l'orifice dans cette section serait

$$MU^2 \left(\frac{O}{mA} - 1\right)^2,$$

U représentant toujours la vitesse moyenne dans le tuyau qui suit l'orifice en un endroit où, les tourbillonnements ayant enfin cessé, les filets sont redevenus à peu près parallèles, ce qui a ordinairement lieu à une distance égale à deux ou trois fois le diamètre de l'orifice.

ÉCOULEMENT DE L'EAU PAR DES DÉVERSOIRS.

Lorsque l'eau s'écoule en passant par-dessus un barrage, une vanne, de manière à se déverser par sa superficie, sans que la surface supérieure rencontre aucun obstacle, on dit que l'écoulement a lieu en *déversoir*, et les circonstances ne sont plus les mêmes que quand il y a charge sur le sommet. Il se produit, à la surface et au-dessus de l'arête intérieure et inférieure de l'orifice, qu'on appelle son *seuil*, une dénivellation, une courbure qui s'étend à quelques décimètres en amont. La charge d'eau qui produit l'écoulement doit alors être mesurée par la hauteur du niveau du réservoir au-dessus de l'arête inférieure ou du seuil. En désignant cette charge par H, la largeur du déversoir par L, on calculera la dépense par la formule

$$Q = m LH \sqrt{2gH},$$

dans laquelle m est un coefficient donné par l'expérience.

MM. Poncelet et Lesbros, opérant sur un déversoir de 0,20 de large, ont obtenu pour ce multiplicateur les valeurs suivantes :

CHARGES SUR LE SEUIL :									
0^m,01,	0^m,02,	0^m,03,	0^m,04,	0^m,06,	0^m,08,	0^m,10,	0^m,15,	0^m,20,	0^m,22,
MULTIPLICATEURS m.									
0,424,	0,417,	0,412,	0,407,	0,401,	0,397,	0,395,	0,393,	0,390,	0,385.

L'orifice sur lequel ces expérimentateurs ont opéré était placé à 0,54 au-dessus du fond et 1,74 environ de chacune des parois verticales, et ses bords étaient à arêtes vives.

Les expériences ont montré que le multiplicateur de la dépense varie, non-seulement avec la charge, mais encore avec la largeur relative ou le rapport de la largeur du déversoir à celle du canal. Il paraît, en effet, diminuer à partir de la largeur égale à celle du canal, jusque vers une largeur égale à 0,25 de celle de ce canal, puis semble ensuite augmenter à mesure que la largeur diminue.

Quand la largeur du déversoir ne varie que depuis $\frac{1}{5}$ de celle du canal jusqu'à la valeur absolue de 0,05, on peut représenter les dépenses, avec une exactitude suffisante pour la pratique, par la formule

$$Q = 0,400\,LH\sqrt{2gH},$$

qui s'appliquera au jaugeage des petits cours d'eau et des sources, par de petits barrages à arêtes vives construits sur le lit.

Cas où la largeur du déversoir est égale à celle du canal. — Lorsque la largeur du déversoir est égale à celle du canal, ce qui s'applique à beaucoup de cas, tels que les vannes de roues hydrauliques, les barrages des rivières, et que le déversoir est vertical, mince et à vive arête, les résultats de l'expérience sont assez exactement représentés par la formule

$$Q = 0,443\,LH\sqrt{2gH}.$$

DU MOUVEMENT DE L'EAU DANS LES TUYAUX DE CONDUITE.

Lorsqu'il s'agit de conduire les eaux d'une source ou d'un bassin dans un réservoir placé à une grande distance, on emploie des tuyaux cylindriques, en terre cuite, en mortier hydraulique, en fonte ou en tôle de fer, dont les parois offrent au mouvement du liquide une résistance qu'il est nécessaire d'apprécier.

On conçoit, en effet, que le mouvement de l'eau étant produit par la différence de pression que le liquide éprouve aux deux extrémités de la conduite, ou par la différence de hauteur des réservoirs supérieur et inférieur, le travail consommé par la résistance des parois absorbera une portion de celui que développera la pesanteur ou la différence des pressions, et diminuera par conséquent celui qui produit le mouvement de transport du liquide, et, par suite, le volume écoulé ou le débit de la conduite. Il importe donc de proportionner convenablement les dimensions et les pentes des conduites au volume d'eau à débiter dans un temps donné, selon les différences de niveau existantes ou à établir entre l'origine de la conduite et le point où elle amènera l'eau.

Cette étude comprend les questions relatives à la distribution des eaux dans les villes, et, sous ce point de vue, elle a depuis longtemps attiré l'attention des ingénieurs et des physiciens. Les travaux de M. de Prony, de M. Girard et de M. Navier ont jeté un grand jour

sur cette branche de l'hydraulique. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats qui peuvent être d'une application plus usuelle et plus immédiate. M. de Prony est parvenu à la formule suivante pour l'écoulement de l'eau dans les tuyaux de fonte dont se composent les conduites :

$$U = 26{,}79\sqrt{\frac{DH}{L}};$$

D est le diamètre du tuyau ;

L est sa longueur ;

H est la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir au-dessus de l'extrémité du tuyau par laquelle l'eau s'écoule : si cette extrémité était elle-même submergée, il faudrait retrancher sa profondeur au-dessous de l'eau ;

U est la vitesse de l'eau à l'orifice ou dans toute la longueur du tuyau, ce qui est la même chose ; car on suppose qu'il a partout le même diamètre.

Pour toutes ces grandeurs, l'unité de mesure est le mètre.

Pour appliquer cette formule, il faut que $\frac{D}{L}$ ne dépasse pas $\frac{1}{100}$, c'est-à-dire que la longueur du tuyau soit au moins de 100 fois son diamètre, et il faut encore que le diamètre ne soit pas lui-même très-petit ; s'il n'avait que quelques millimètres ou même 1 centimètre, la formule donnerait sans doute des résultats trop forts. Dans ces limites, elle a été vérifiée par M. de Prony avec tant de soin, que l'on peut la regarder comme très-exacte ; elle s'accorde avec l'expérience pour des conduites qui ont jusqu'à 2280 mètres de longueur. Il nous a semblé nécessaire de donner un tableau contenant les résultats obtenus au moyen de cette formule ; on peut en avoir le plus souvent besoin dans la pratique.

La première colonne verticale contient les valeurs de H ou les pressions qui s'exercent sur l'orifice d'écoulement ; elles vont en croissant de deux décimètres en deux décimètres, depuis 2 décimètres jusqu'à 10 mètres.

La première colonne horizontale contient les valeurs de $\frac{D}{L}$ ou les rapports du diamètre du tuyau à sa longueur ; ce rapport va croissant de cinq dix-millièmes en cinq dix-millièmes depuis 1 millième jusqu'à 1 centième.

Au croisement d'une colonne horizontale et d'une colonne verticale se trouve la valeur de U, ou la vitesse d'écoulement correspondante aux nombres qui sont en tête des deux colonnes.

Par exemple, si l'on veut avoir la vitesse d'écoulement sous une pression de $5^m{,}4$ par un tuyau dont le diamètre, divisé par la longueur, donne 0,0045, on suivra la colonne horizontale qui commence par $5^m{,}4$ jusqu'à ce qu'elle coupe la colonne verticale commencant par 0,0045 ; le nombre 4,176 qui se trouve au croisement indique que, dans ces circonstances, la vitesse d'écoulement est, par seconde, de 4 mètres et 176 millimètres.

Pour des nombres qui ne seraient compris ni dans la colonne verticale des pressions, ni dans la colonne horizontale des rapports du diamètre à la longueur, il faudrait intercaler par les méthodes ordinaires.

Problème. — On peut encore résoudre le problème suivant : Étant donnés, la hauteur H d'un réservoir, la longueur L de la conduite, et le nombre M de mètres cubes que l'on veut avoir par seconde, trouver le diamètre du tuyau capable de fournir cette dépense. Il suffira de mettre pour H, L et M leurs valeurs dans la formule

$$D = 0,1865 \frac{\sqrt[5]{LM^2}}{H}.$$

Le résultat sera en mètres la valeur du diamètre cherché.

TABLE DES VITESSES DE L'EA…

	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,0035	0,004	0,0045	0,005
0,2	0,379	0,464	0,536	0,599	0,656	0,709	0,758	0,804	0,847
0,4	0,536	0,656	0,758	0,847	0,928	1,002	1,072	1,137	1,198
0,6	0,656	0,804	0,928	1,038	1,137	1,228	1,312	1,392	1,467
0,8	0,758	0,928	1,072	1,198	1,312	1,418	1,515	1,607	1,694
1,0	0,847	1,038	1,019	1,340	1,467	1,585	1,694	1,797	1,894
1,2	0,928	1,137	1,312	1,467	1,607	1,736	1,856	1,969	2,075
1,4	1,002	1,228	1,418	1,585	1,736	1,875	2,005	2,126	2,241
1,6	1,072	1,312	1,515	1,694	1,856	2,005	2,143	2,273	2,396
1,8	1,137	1,392	1,607	1,797	1,969	2,126	2,273	2,411	2,542
2,0	1,198	1,467	1,694	1,894	2,075	2,241	2,396	2,542	2,679
2,2	1,256	1,539	1,777	1,987	2,176	2,351	2,513	2,666	2,810
2,4	1,312	1,607	1,856	2,075	2,273	2,455	2,625	2,784	2,935
2,6	1,366	1,673	1,932	2,160	2,366	2,556	2,732	2,898	3,055
2,8	1,418	1,736	2,005	2,241	2,455	2,652	2,835	3,007	3,170
3,0	1,467	1,797	2,075	2,320	2,542	2,745	2,935	3,113	3,281
3,2	1,515	1,856	2,143	2,396	2,625	2,845	3,031	3,215	3,389
3,4	1,562	1,913	2,209	2,470	2,706	2,922	3,124	3,314	3,493
3,6	1,607	1,969	2,273	2,542	2,784	3,007	3,215	3,410	3,594
3,8	1,651	2,023	2,335	2,611	2,860	3,089	3,308	3,503	3,693
4,0	1,694	2,075	2,396	2,679	2,935	3,170	3,389	3,594	3,789
4,2	1,736	2,126	2,455	2,745	3,007	3,248	3,472	3,683	3,882
4,4	1,777	2,176	2,513	2,810	3,078	3,325	3,554	3,770	3,974
4,6	1,817	2,225	2,570	2,873	3,147	3,399	3,634	3,854	4,063
4,8	1,856	2,273	2,625	2,935	3,215	3,472	3,712	3,937	4,150
5,0	1,894	2,320	2,679	2,995	3,281	3,544	3,789	4,018	4,236
5,2	1,932	2,366	2,732	3,055	3,346	3,614	3,864	4,098	4,320
5,4	1,969	2,411	2,784	3,123	3,410	3,683	3,937	4,176	4,402
5,6	2,005	2,455	2,835	3,170	3,472	3,751	4,010	4,253	4,483
5,8	2,040	2,499	2,885	3,226	3,534	3,817	4,081	4,328	4,562
6,0	2,075	2,542	2,935	3,281	3,594	3,882	4,150	4,402	4,640
6,2	2,109	2,584	2,983	3,335	3,654	3,946	4,219	4,475	4,717
6,4	2,143	2,625	3,031	3,389	3,712	4,010	4,286	4,546	4,792
6,6	2,176	2,666	3,078	3,441	3,770	4,072	4,353	4,617	4,867
6,8	2,209	2,706	3,124	3,493	3,826	4,133	4,418	4,686	4,940
7,0	2,241	2,745	3,170	3,544	3,882	4,193	4,483	4,755	5,012
7,2	2,273	2,784	3,215	3,594	3,937	4,253	4,546	4,822	5,083
7,4	2,305	2,823	3,259	3,644	3,992	4,311	4,609	4,889	5,153
7,6	2,335	2,860	3,303	3,693	4,045	4,369	4,671	4,954	5,222
7,8	2,366	2,898	3,346	3,741	4,098	4,426	4,732	5,019	5,291
8,0	2,397	2,935	3,389	3,789	4,150	4,483	4,792	5,083	5,358
8,2	2,426	2,971	3,431	3,836	4,202	4,539	4,852	5,146	5,425
8,4	2,455	3,007	3,472	3,882	4,253	4,594	4,911	5,209	5,490
8,6	2,484	3,043	3,513	3,928	4,303	4,648	4,969	5,270	5,555
8,8	2,513	3,078	3,554	3,974	4,353	4,702	5,026	5,331	5,620
9,0	2,542	3,113	3,594	4,018	4,402	4,755	5,083	5,391	5,683
9,2	2,570	3,147	3,634	4,063	4,451	4,807	5,139	5,451	5,746
9,4	2,597	3,181	3,673	4,107	4,499	4,859	5,195	5,510	5,808
9,6	2,625	3,215	3,712	4,150	4,546	4,911	5,250	5,568	5,869
9,8	2,652	3,248	3,751	4,193	4,594	4,962	5,304	5,626	5,930
10,0	2,679	3,281	3,789	4,236	4,670	5,012	5,358	5,683	5,990

UI S'ÉCOULE DANS LES TUYAUX.

0,0055	0,006	0,0065	0,007	0,0075	0,008	0,0085	0,009	0,0095	0,01
0,889	0,928	0,966	1,002	1,038	1,072	1,105	1,137	1,168	1,198
1,256	1,312	1,366	1,418	1,467	1,515	1,562	1,607	1,651	1,694
1,539	1,607	1,673	1,736	1,797	1,856	1,913	1,969	2,023	2,075
1,777	1,856	1,932	2,005	2,075	2,143	2,209	2,273	2,335	2,396
1,987	2,075	2,160	2,241	2,320	2,396	2,470	2,542	2,611	2,679
2,176	2,273	2,366	2,455	2,541	2,625	2,706	2,784	2,860	2,935
2,351	2,455	2,556	2,652	2,745	2,835	2,922	3,007	3,090	3,170
2,513	2,625	2,732	2,835	2,935	3,031	3,124	3,215	3,303	3,389
2,666	2,784	2,898	3,007	3,114	3,215	3,314	3,410	3,503	3,594
2,810	2,935	3,055	3,170	3,281	3,389	3,493	3,594	3,693	3,789
2,947	3,078	3,204	3,325	3,441	3,554	3,663	3,770	3,873	3,974
3,078	3,215	3,346	3,472	3,594	3,712	3,826	3,937	4,045	4,150
3,204	3,346	3,483	3,614	3,741	3,864	3,983	4,098	4,210	4,320
3,325	3,472	3,614	3,751	3,882	4,010	4,133	4,253	4,369	4,483
3,441	3,594	3,741	3,882	4,018	4,150	4,278	4,402	4,523	4,640
3,554	3,712	3,864	4,010	4,150	4,286	4,418	4,546	4,671	4,792
3,663	3,826	3,983	4,133	4,278	4,418	4,554	4,686	4,825	4,940
3,770	3,937	4,098	4,253	4,402	4,546	4,686	4,822	4,954	5,083
3,873	4,045	4,210	4,369	4,523	4,671	4,815	4,954	5,090	5,222
3,974	4,150	4,320	4,483	4,640	4,792	4,940	5,083	5,222	5,358
4,072	4,253	4,426	4,594	4,755	4,911	5,062	5,209	5,351	5,490
4,168	4,353	4,531	4,702	4,867	5,026	5,181	5,331	5,477	5,620
4,261	4,451	4,632	4,807	4,976	5,139	5,297	5,451	5,600	5,746
4,353	4,546	4,732	4,911	5,083	5,250	5,411	5,568	5,721	5,869
4,443	4,640	4,830	5,012	5,188	5,358	5,523	5,683	5,839	5,990
4,531	4,732	4,925	5,111	5,291	5,464	5,632	5,796	5,954	6,109
4,617	4,822	5,019	5,209	5,391	5,568	5,740	5,906	6,068	6,225
4,702	4,911	5,111	5,304	5,490	5,670	5,845	6,014	6,179	6,340
4,785	4,998	5,202	5,398	5,587	5,771	5,948	6,121	6,289	6,452
4,867	5,083	5,291	5,490	5,683	5,869	6,050	6,225	6,396	6,562
4,947	5,167	5,378	5,581	5,777	5,966	6,150	6,328	6,502	6,671
5,026	5,250	5,464	5,670	5,869	6,062	6,248	6,429	6,606	6,777
5,104	5,331	5,549	5,758	5,960	6,156	6,345	6,529	6,708	6,882
5,181	5,411	5,632	5,845	6,050	6,248	6,441	6,627	6,809	6,986
5,257	5,490	5,715	5,930	6,138	6,340	6,535	6,724	6,908	7,088
5,331	5,568	5,796	6,014	6,225	6,430	6,627	6,820	7,006	7,189
5,405	5,645	5,876	6,097	6,311	6,518	6,719	6,914	7,103	7,288
5,477	5,721	5,954	6,179	6,396	6,606	6,809	7,006	7,198	7,385
5,549	5,796	6,032	6,260	6,480	6,692	6,898	7,098	7,293	7,482
5,620	5,869	6,109	6,340	6,562	6,777	6,986	7,189	7,385	7,577
5,689	5,942	6,185	6,418	6,644	6,862	7,073	7,278	7,477	7,671
5,758	6,014	6,260	6,496	6,724	6,945	7,158	7,366	7,568	7,764
5,826	6,086	6,334	6,573	6,804	7,027	7,243	7,453	7,657	7,856
5,894	6,156	6,407	6,649	6,882	7,108	7,327	7,539	7,746	7,947
5,960	6,225	6,480	6,724	6,960	7,189	7,410	7,625	7,833	8,037
6,026	6,294	6,551	6,779	7,037	7,268	7,492	7,709	7,920	8,126
6,091	6,362	6,622	6,872	7,113	7,347	7,573	7,792	8,006	8,214
6,156	6,430	6,692	6,945	7,189	7,424	7,653	7,875	8,090	8,301
6,220	6,496	6,761	7,017	7,263	7,501	7,732	7,956	8,174	8,387
6,283	6,562	6,830	7,088	7,337	7,577	7,811	8,037	8,257	8,472

DE LA PENTE A DONNER AUX CONDUITES D'EAU.

Il importe beaucoup, dans la plupart des cas, de ne donner aux conduites que la pente nécessaire pour produire le mouvement et vaincre la résistance des parois afin que la différence de hauteur entre le réservoir alimentaire et celui de réception soit la plus faible possible.

Lorsque le diamètre du tuyau et le volume de l'eau écoulée, et, par suite, la vitesse moyenne U, seront donnés, la formule de M. de Prony $\frac{1}{4} g \frac{DJ}{U}$ dans laquelle $\frac{H}{L} = J$, nous donnera, par la déclivité J, la valeur

$$J = \frac{4}{D}(0{,}0000173\ U + 0{,}000348\ U^2),$$

d'où l'on deduira la pente totale H = JL nécessaire pour que la composante de la pesanteur dans le sens de la longueur du tuyau puisse vaincre les résistances. Cette pente totale s'appelle la *pente de chute ou de charge* produite par la résistance des parois.

En la retranchant de la hauteur du réservoir alimentaire au-dessus de l'extrémité de la conduite, le reste sera la hauteur à laquelle l'eau pourrait s'élever à l'extrémité inférieure de la conduite, soit au jet d'eau, soit dans le réservoir de réception.

OBSERVATIONS SUR L'INFLUENCE DE LA VITESSE SUR LA PERTE DE CHUTE.

On voit que la pente à donner aux conduites croît rapidement avec la vitesse et par conséquent avec le volume à débiter. Or, d'autre part, pour un volume donné, la vitesse étant en raison inverse du carré du diamètre, il est nécessaire d'établir entre toutes les quantités qui entrent dans les équations des relations convenables pour chaque cas.

RELATION ENTRE LE VOLUME D'EAU, LA DÉCLIVITÉ ET LE DIAMÈTRE DE LA CONDUITE.

Si, dans la formule

$$U = 53{,}58\sqrt{\frac{DJ}{4}} - 0{,}025,$$

on met pour U sa valeur $U = \frac{1{,}273\,Q}{D^2}$, elle devient

$$1{,}273\,Q = 53{,}58\sqrt{\frac{D^5 J}{4}} - 0{,}025\,D^2$$

ou

$$Q = 21{,}045\sqrt{D^5 J} - 0{,}0196\,D^2,$$

relation qui donnera l'une des trois quantités D, J ou Q, lorsque les deux autres sont connues. Mais comme elle est du 5ᵉ degré en D, sa solution présenterait pour la pratique des difficultés qu'il faut chercher à éviter. On peut donc se contenter d'un résultat approximatif en négligeant, dans le second membre, le terme $0{,}0196\,D^2$,

et alors l'équation se réduirait à

$$Q = 21,045 \sqrt{D^5 J},$$

d'où l'on tirerait pour le diamètre la valeur

$$D = 0,2955 \sqrt[5]{\frac{Q^2}{J}}$$

évidemment trop faible, mais qui sera néanmoins suffisamment exacte pour tous les cas où la vitesse de l'eau qui serait donnée par la formule $\frac{1,273 Q}{D^2}$ serait égale ou supérieure à $0^m,50$. Pour les cas où la vitesse serait inférieure à 0,50, ou dans lesquels on aurait besoin d'une plus grande approximation, on pourra procéder ainsi qu'il suit.

Dans l'équation

$$Q = 21,045 \sqrt{D^5 J} - 0,0196 D^2,$$

on mettra pour Q et pour J les valeurs que prendra le deuxième membre de cette équation par la substitution successive de différentes valeurs du diamètre D, en partant de celle qui aura été fournie par la formule approximative ci-dessus, et croissantes de cinq en cinq millimètres, ou de centimètre en centimètre, jusqu'à ce que le second membre de l'équation, qui croîtra avec ces valeurs, excède la valeur donnée du premier membre.

Cela fait, on prendra pour abscisses les valeurs successives du diamètre D, et pour ordonnées correspondantes les valeurs trouvées par le second membre. Par les points ainsi déterminés, on fera passer une courbe; puis, parallèlement à la ligne des abscisses, on mènera une ligne droite à une distance égale à la valeur de Q. Cette droite coupera la courbe en un point dont l'abscisse sera le diamètre cherché. Il est évident, en effet, que cette valeur du diamètre, substituée dans l'équation, donnerait, pour le second membre, ou l'ordonnée de la courbe, une valeur égale à celle de Q ou du premier membre.

Exemple. — Supposons qu'il s'agisse de trouver le diamètre d'une conduite destinée à transporter $0^{mc},02666$ en 1 seconde avec une déclivité $J = 0,0001937$.

La forme approximative donne

$$D = 0,2955 \sqrt[5]{\frac{(0,02666)^2}{0,0001937}} = 0^m,3832.$$

Puis, en substituant successivement dans la formule complète,

$$Q = 21,055 \sqrt{D^5 J} - 0,0198 D^2,$$

on a respectivement : valeurs de D,

$0^m,3832$, $0^m,3900$, $0^m,4000$, $0^m,4100$;

valeurs du second membre,

$0^m,023778$, $0^m,024840$, $0^m,026503$, $0^m,028230$.

La construction de la courbe montre que son intersection avec une parallèle à l'axe des abscisses, menée à une distance $Q = 0^m,02666$, a lieu en un point dont l'abscisse est $D = 0,40093$, ce qui donne avec une exactitude suffisante le diamètre convenable pour la conduite.

DES TABLES DESTINÉES A FACILITER LES CALCULS D'ÉTABLISSEMENT DES CONDUITES.

Lorsqu'il ne s'agit que d'une conduite unique destinée à conduire des eaux d'un point donné à un autre, la méthode précédente ne mène pas à des calculs assez pénibles pour arrêter des ingénieurs; mais, pour l'établissement complet d'un réseau de tuyaux pour les distributions d'eau dans les villes, où les volumes, les pentes et les distances varient pour ainsi dire à chaque endroit, il est de la plus grande utilité pour les ingénieurs de posséder des Tables de calculs tout faits comprenant les cas les plus usuels de la pratique.

En effet, il convient, pour la facilité des ajutages et l'assortiment des pièces d'assemblage, de classer les tuyaux, et d'établir à l'avance la série des diamètres qui seront mis en service, en les graduant de manière à pouvoir comprendre tous les cas ordinaires.

M. de Prony avait donné une Table des valeurs correspondantes de Q, de D et de J pour des volumes variables de dixième en dixième de litre par seconde depuis $0^{lit},1$ jusqu'à 1 litre; puis de litre en litre, depuis 1 litre jusqu'à 10 litres pour des diamètres de tuyaux compris entre 0,01 et 0,50. Mais cette Table ne suffit pas aux besoins de la pratique.

M. Mary, ingénieur en chef directeur des eaux de Paris, a calculé des Tables bien plus étendues, comprenant tous les diamètres de tuyaux en usage dans ce service, en classant les volumes d'eau débités par dixièmes de pouce de fontainiers, depuis $0^{po},1$ jusqu'à 1 pouce; de 0,5 en 0,5 de pouce depuis 1 pouce jusqu'à 10 pouces; puis de pouce en pouce, depuis 10 pouces jusqu'à 100 pouces; de deux en deux pouces depuis 100 pouces jusqu'à 200; de cinq en cinq pouces depuis 200 jusqu'à 500; et enfin de dix en dix pouces depuis 500 jusqu'à 1000.

Les diamètres compris dans ces Tables, sont ceux de $0^m,06$, $0^m,081$, $0^m,108$, $0^m,135$, $0^m,162$, $0^m,190$, $0^m,216$, $0^m,250$, $0^m,300$, $0^m,320$, $0^m,350$, $0^m,400$, $0^m,450$, $0^m,500$ et $0^m,600$.

Cette classification a été commandée par les constructions existantes, établies d'après les anciennes mesures linéaires et de jaugeage. M. Arthur Morin, colonel d'artillerie, a calculé d'autres Tables plus en harmonie avec le système métrique actuellement en usage et pour des tuyaux du diamètre de $0^m,05$, $0^m,06$, $0^m,08$, $0^m,10$, $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$, $0^m,30$, $0^m,35$, $0^m,40$, $0^m,45$, $0^m,50$ pour des volumes compris entre $0^{lit},01$ et 850 litres à débiter en une seconde.

Dans ces Tables, comme dans celles de M. Mary, le volume d'eau à débiter étant donné, on trouve, pour chaque diamètre de tuyau, la vitesse moyenne U et la déclivité ou pente, par mètre, qu'il est nécessaire de donner au tuyau pour que la composante de la gravité puisse vaincre les résistances; c'est ce que l'on y désigne sous le nom de *perte de charge par mètre courant*.

ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS UNE CONDUITE D'UN DÉBIT UNIFORME SANS AUCUN ORIFICE SUR SA LONGUEUR.

Si le volume d'eau à débiter est donné, ainsi que la pente par mètre

que doit avoir la conduite, on cherchera dans les premières colonnes à gauche de la Table le volume donné, et sur les lignes horizontales correspondantes la perte de chute la plus voisine, mais en dessous de la pente, par mètre courant, que l'on veut donner à la conduite. Le diamètre du tuyau, inscrit en haut de la colonne, sera un peu plus grand que celui qui serait nécessaire; mais, dans la plupart des cas, il fournira une solution assez approchée de la véritable pour pouvoir être adoptée.

Exemple. — Soit proposé de conduire un volume d'eau de $0^{mc},400$ par seconde à une distance de 300 mètres avec une pente totale de 2 mètres ou une pente, par mètre, égale à

$$\frac{2,00}{300} = 0^{m},00666.$$

On trouve dans la Table que la perte de chute, par mètre, la plus voisine de celle-ci, mais inférieure, correspondante au volume de $0^{mc},400$ est $0^{m},004810$ et serait convenable avec un tuyau de $0^{m},60$ de diamètre. Comme la pente de 0,00481 est inférieure à celle dont on dispose, on pourrait employer un diamètre plus petit que 0,60. Mais le diamètre de 0,50, immédiatement inférieur, contenu dans la Table exigerait, pour le même volume débité, une pente, par mètre, de $0^{m},011844$ plus grande que celle de 0,00666.

En opérant par parties proportionnelles, on pourra facilement obtenir une valeur suffisamment approchée du diamètre convenable. On voit, en effet, qu'une augmentation de $0^{m},01$ dans le diamètre pour le volume de $0^{mc},400$ à débiter en 1 seconde correspond à une différence de déclivité de

$$0^{m},0011844 - 0^{m},004810 = 0^{m},007034.$$

La différence de déclivité $0^{m},00666 - 0^{m},00481 = 0^{m},00185$ correspondra donc à une différence de diamètre donnée approximativement par la proportion

$$0^{m},007034 : 0^{m},10 :: 0,00185 : x = \frac{0,00185 \times 0,10}{0,007034} = 0^{m},026.$$

Par conséquent, le diamètre convenable pour débiter $0^{mc},400$ en une seconde avec la pente, par mètre, de 0,00666 sera

$$0^{m},600 - 0^{m},026 = 0^{m},574.$$

DÉTERMINER A QUELLE HAUTEUR L'EAU POURRA S'ÉLEVER AU-DESSUS DU SOL A L'EXTRÉMITÉ D'UNE CONDUITE DONT LE PRODUIT ET LE DIAMÈTRE SONT DONNÉS.

On cherchera dans la Table, aux colonnes correspondantes au diamètre donné, le produit de la conduite, et, sur la même ligne horizontale, on trouvera la déclivité convenable ou perte de chute par mètre courant. En la multipliant par la longueur développée de la conduite, on aura la portion totale de la chute, ou de la différence de niveau entre le réservoir supérieur et l'extrémité inférieure de la conduite qui sera employée à vaincre les résistances. En retranchant cette perte de charge de cette différence de niveau, le reste sera la hauteur à laquelle l'eau pourrait s'élever au-dessus de l'extrémité inférieure

de la conduite, soit dans un réservoir, soit par un jet d'eau convenablement disposé.

On voit tout de suite, soit par les formules, soit par les Tables, que, pour un même volume d'eau à débiter, les pertes de chute sont d'autant plus grandes que les tuyaux sont plus petits.

Si, par exemple, une conduite de 0,05 de diamètre débite 3 litres d'eau par seconde, la perte de chute produite par la résistance des parois est de $0^m,067158$ par mètre courant; et, en supposant que la longueur développée de cette conduite soit de 100 mètres, la perte totale sera de $6^m,716$. Par conséquent, si le réservoir supérieur est à 10,00 au-dessus de l'extrémité de la conduite, l'eau pourra s'élever à

$$10,00 - 6,716 = 3^m,284$$

au-dessus de cette extrémité.

En d'autres termes, l'eau pourra s'élever ou être reçue à un niveau inférieur de 6,716 à celui du réservoir supérieur.

Lors donc que les hauteurs respectives des deux réservoirs seront données, ainsi que le produit de la conduite, il faudra choisir son diamètre de manière que la résistance des parois ne consomme pas une portion de chute supérieure, ni même égale, à leur différence de niveau.

DISTRIBUTION D'EAU PAR UNE CONDUITE D'UN DIAMÈTRE UNIFORME, ALIMENTANT DANS SA LONGUEUR DIVERS ÉCOULEMENTS D'UN VOLUME DÉTERMINÉ.

Lorsqu'il se fait sur la longueur de la conduite des prises d'eau à différentes distances, on considère chaque intervalle entre deux orifices comme une conduite particulière, en commençant par la partie supérieure qui doit débiter le volume total. On peut alors, par les règles précédentes, calculer le diamètre ou la perte de chute par mètre courant, selon que le volume et la pente, ou que le volume et le diamètre sont donnés. Dans ce dernier cas, par exemple, après avoir calculé la perte de chute faite par la première partie de la conduite, on en déduira la hauteur à laquelle l'eau pourrait s'élever au premier orifice, hauteur qui, pour la seconde partie, devient la pression motrice. On opérera ensuite de même de proche en proche, et l'on aura la perte totale de chute produite par les résistances. Il est évident que cette perte doit toujours être moindre que la pente totale de la conduite qui est ordinairement donnée; s'il en était autrement, ce serait une preuve que la conduite n'a pas un diamètre assez grand pour débiter le volume d'eau proposé.

DISTRIBUTION D'EAU PAR UNE CONDUITE DONT LE DIAMÈTRE VARIE.

Lorsque l'on a une chute ou pente totale suffisante, l'économie doit engager à diminuer le diamètre de la conduite à mesure que le volume à débiter devient plus petit. La pente totale étant donnée, on devra calculer les diamètres de chaque partie, de manière que la somme des pertes de charge n'excède pas cette pente, et de façon

qu'à chaque point de prise d'eau il y ait encore une hauteur de pression suffisante pour assurer le débit voulu.

CONDITION RELATIVE A LA PRESSION QUI DOIT EXISTER PRÈS DES ORIFICES DE PRISE D'EAU.

Connaissant le volume d'eau qui doit être fourni par une prise faite sur une conduite et la disposition de l'orifice d'écoulement, il sera facile, par les formules précédemment données, de calculer la hauteur de pression exprimée en colonne d'eau nécessaire pour assurer ce débit. On devra vérifier, après le calcul du diamètre de la conduite, si, en retranchant la perte de charge occasionnée par la résistance de la charge totale au-dessus de l'orifice de la prise d'eau, le reste est encore supérieur à la hauteur nécessaire pour produire le débit voulu. Dans le cas où ce reste serait trop faible, il faudrait augmenter le diamètre de la conduite.

Pour les bornes-fontaines, par exemple, dont le débit est estimé en moyenne à 2 litres au plus en 1 seconde, on admet qu'avec les modèles de bouches adoptées à Paris, il suffit d'une hauteur de pression de quelques décimètres au-dessus de cette bouche, ordinairement placée à $0^m,50$ au-dessus du sol.

ÉCOULEMENT PAR UNE CONDUITE DE 0,25 ALIMENTANT CINQ ORIFICES.

VOLUME débité en 1 seconde.	DIAMÈTRE de la conduite.	LONGUEUR de la conduite.	VITESSE moyenne.	PERTE DE CHARGE par mètre.	PERTE DE CHARGE totale.	HAUTEUR de pression aux orifices.
litres			m	m	m	m
50		100,00	1,0186	0,006064	0,60640	0,894
40		80,00	0,8149	0,003926	0,31408	0,580
30	0,250	70,00	0,6112	0,002251	0,15757	0,422
20		100,00	0,4074	0,001038	0,10380	0,318
10		80,00	0,2037	0,000288	0,02304	0,295
					1,20489	

Si les prises d'eau étaient des conduites destinées à répartir les 10 litres que chacune d'elles reçoit entre cinq orifices de bornes-fontaines, il faudrait s'assurer que la hauteur de pression à l'origine de ces conduites, appelées branchements, serait suffisante pour y produire le mouvement en ayant égard à sa pente particulière et à son diamètre; et si l'on trouvait qu'elle ne l'est pas, on recommencerait le calcul de la conduite principale avec un plus grand diamètre. Ce serait, par exemple, ce qu'il y aurait à faire dans le cas de l'exemple précédent, où la hauteur de pression égale à $0^m,295$ serait trop faible pour vaincre les résistances et assurer le débit d'une conduite desservant cinq bornes-fontaines à 2 litres par seconde pour chacune.

Si, au lieu d'une pente totale de $1^m,50$, on en avait une de 4 mètres,

par exemple, on pourrait, en sacrifiant aux résistances une plus grande portion de cette pente, employer une conduite de diamètres décroissants, ainsi qu'il suit :

VOLUME débité en 1 seconde.	DIAMÈTRE de la conduite.	LONGUEUR de la conduite.	VITESSE moyenne.	PERTE DE CHARGE par mètre.	PERTE DE CHARGE totale.	HAUTEUR de pression aux orifices.
litres	m		m	m	m	m
50	0,250	100,00	1,0186	0,006064	0,60640	3,394
40	0,200	80,00	1,2732	0,011733	0,93864	2,455
30		70,00	0,9549	0,006682	0,46774	1,987
20	0,150	100,00	1,1318	0,012419	1,24190	0,745
10		80,00	0,5659	0,003235	0,25880	0,486
					3,51348	

On voit, par cet exemple, combien la perte de charge produite par les résistances augmente quand le diamètre des conduites diminue.

INFLUENCE DES CHANGEMENTS BRUSQUES DE DIRECTION DES CONDUITES.

Lorsque l'eau qui circule dans une conduite éprouve un changement brusque de direction, ainsi que l'indique la *fig.* 24, *Pl. XIII*, les filets fluides, rencontrant une paroi dont les arêtes sont perpendiculaires à leur direction, se dévient, et il se produit dans la nouvelle conduite, un peu au delà du coude, une contraction d'autant plus sensible que la vitesse est plus grande.

Dans cette section contractée, la vitesse du fluide est considérablement augmentée; puis, un peu plus loin, les filets ont repris leur parallélisme, et si la nouvelle conduite a le même diamètre que l'autre, la vitesse redevient la même. Par conséquent, le travail développé pour produire l'accélération au passage de la veine contractée dans le coude, ou la force vive communiquée, a été complétement perdu. Toute déviation de ce genre occasionne donc une perte de force vive ou de travail moteur et consomme une portion de la charge motrice. Il se produit un effet analogue, *fig.* 25, *Pl. XIII*, quand une conduite s'embranche sur une autre; et l'on voit que dans les distributions d'eau, où il y a un grand nombre de branchements semblables, ces pertes se multiplient tellement, qu'il importe de les éviter autant que possible et d'en tenir compte dans les calculs.

Dans les distributions d'eau bien disposées, le changement de direction d'une conduite se fait en raccordant les deux directions données par un tuyau arrondi, dont la forme atténue beaucoup les effets que nous venons d'indiquer; en comparant pour des tuyaux coudés et des tuyaux droits de même longueur les charges motrices nécessaires pour produire l'écoulement d'un même volume d'eau, on a déterminé l'augmentation de charge qu'exigeraient les coudes.

En discutant les résultats de ces expériences, M. Navier a reconnu que l'on pouvait les représenter, avec une exactitude suffisante pour les applications, par la formule

$$h = \mathrm{H}\,(0{,}0039 + 0{,}0186\,r)\,\frac{c}{r^2},$$

dans laquelle on représente par

h la perte de la charge cherchée ;
H la hauteur due à la vitesse moyenne de l'eau dans la conduite ;
r le rayon d'arrondissement de l'axe de la conduite ;
c la longueur développée de cet axe du coude.

D'après cette formule, la perte de charge produite par les coudes croîtrait comme les hauteurs dues aux vitesses moyennes, ou comme les carrés de ces vitesses, ce qui doit engager à limiter les vitesses moyennes. En général, en donnant aux arrondissements des coudes des dimensions convenables, on parvient, dans la plupart des cas, à restreindre beaucoup la perte de charge due à cette cause.

PROPORTIONS DES COUDES DANS LE SERVICE DES EAUX DE PARIS.

DIAMÈTRES des conduites.	RAYON de raccordement des axes.	DÉVELOPPEMENT de l'axe du coude en parties de la circonférence.
0,05 / 0,06	0,45	0,250
0,08 / 0,10	0,50	0,250
0,15	0,75	0,250
0,20	1,00	(0,250)
0,25 et au-dessus.	1,50	0,125

Quant aux coudes brusques qui se présentent dans les pénétrations de deux tuyaux de diamètres égaux ou différents, il n'y a pas d'expériences propres à permettre d'en apprécier l'effet ; mais ils occasionnent des pertes de force vive très-notables ; et, sous ce rapport, il y aurait lieu de modifier la forme des embranchements des conduites d'eau pour diminuer cet effet qui se répète souvent sur l'étendue d'une même conduite.

PRESSION EXERCÉE PAR L'EAU EN UN POINT QUELCONQUE DE LA CONDUITE.

Connaissant la perte de charge qui est produite par les résistances, depuis l'origine de la conduite jusqu'au point que l'on considère, si on la retranche de la pression motrice totale, depuis le réservoir supérieur jusqu'à ce point, calculée d'après les formules précédentes,

on aura la pression au point donné exprimée par la hauteur à laquelle l'eau prise en ce point pourrait s'élever.

Mais cette valeur de la pression, supportée par la paroi du tuyau pendant le mouvement du liquide, non plus que la pression plus considérable qu'elle éprouve quand le mouvement n'a pas lieu, ne peut servir à calculer l'épaisseur des parois, si la circulation de l'eau est exposée à des arrêts brusques. Il faut alors donner un excédant de résistance, et l'observation a fait connaître les dimensions convenables. On peut calculer l'épaisseur convenable e par la formule

$$e = 0{,}00238\, nd + 0^{m}{,}0085,$$

dans laquelle d est le diamètre et n le nombre d'atmosphères de pression auquel le tuyau doit résister à l'épreuve, et que l'on fait ordinairement égal à 10.

PERTE DE FORCE VIVE PRODUITE PAR LES ÉTRANGLEMENTS DES CONDUITES.

Lorsqu'une conduite présente à son intérieur un rétrécissement produit par la saillie de quelqu'une de ses parties, par la disposition des assemblages, par un pli, ainsi que cela arrive fréquemment aux tuyaux en plomb, on dit qu'il y a étranglement. D'après la condition de la continuité de la masse fluide, chaque section devant donner passage dans le même temps à un même volume, il s'ensuit nécessairement que la vitesse au passage par cet étranglement est plus grande qu'en avant et en arrière. Cette accélération exige donc la consommation d'une portion du travail moteur employée à imprimer au liquide l'accroissement correspondant de force vive; et après le passage, cet accroissement de force vive étant détruit par les tourbillonnements et les mouvements relatifs des molécules fluides les unes sur les autres, puisque l'eau reprend la vitesse et, par suite, la force vive qu'elle avait avant le passage, il en résulte que le travail développé pour produire l'accélération au passage est totalement perdu. Il suit de là que tout rétrécissement ou étranglement d'une conduite, soit brusque, soit raccordé par des contours plus ou moins continus, produit une perte de force vive ou de travail moteur.

En appelant u la vitesse moyenne de l'eau dans les tuyaux;

V la vitesse à l'étranglement ou plutôt à la section contractée un peu au delà de ce passage,

m' le coefficient de la contraction au même endroit,

A' l'aire du passage,

A l'aire de la section du tuyau,

la perte de force vive produite par cet étranglement à chaque seconde sera exprimée par

$$M(V-U)^2 = M\left(\frac{A}{m'A'} - 1\right)^2 U^2,$$

à cause de $m'A'V = AU$.

De sorte que la force vive totale communiquée au fluide en 1 seconde sera

$$MU^2\left[1 + \left(\frac{A}{m'A'} - 1\right)^2\right].$$

On devra donc ajouter à la force vive possédée par la masse d'eau qui passe, dans chaque seconde, dans les parties de la conduite autant de termes analogues à

$$M\left(\frac{A}{m'A'}-1\right)^2 U^2$$

qu'il y aura d'étranglements, en ayant soin de prendre pour chacun d'eux les valeurs convenables de m' et de A'.

Au sujet des valeurs de m', on fera remarquer qu'elles doivent croître à mesure que le diamètre de l'étranglement se rapproche de celui du tuyau à partir de la valeur $m = 0{,}60$, correspondante au cas où le diamètre du tuyau serait inférieur à la moitié de celui de la conduite, jusqu'à environ 0,85 ou 0,90, au plus, que l'on pourra adopter quand la différence des diamètres ne sera plus que de $\frac{1}{10}$ environ de celui de la conduite. On manque d'expériences spéciales pour déterminer cette valeur du multiplicateur de la dépense, dans des cas pareils, et ce n'est que comme moyen d'approximation que l'on indique les précédentes.

PERTE DE FORCE VIVE PRODUITE PAR L'ÉLARGISSEMENT DES CONDUITES.

Tout élargissement d'une conduite produit aussi une perte de force vive; en effet, en nommant

O l'aire de la section transversale;

U' la vitesse moyenne dans la partie élargie de la conduite;

et conservant les notations précédentes, la perte de force vive produite par cet élargissement sera exprimée par

$$M(U-U')^2 = MU^2\left(1-\frac{A}{O}\right)^2,$$

à cause de la relation $AU = OU'$, fournie par la condition de continuité de la masse liquide.

Il suit donc encore de là qu'à la force vive, possédée par l'eau qui passe en chaque seconde dans la conduite, et à celle qui est perdue aux étranglements, on devra ajouter, pour celle qui est perdue par l'effet des élargissements de la conduite, autant de termes analogues à

$$MU^2\left(1-\frac{A}{O}\right)^2$$

qu'il y aura d'élargissements.

CONSÉQUENCES RELATIVES A LA FORME DES CONDUITES.

Il résulte de ce qui précède que, pour l'économie du travail moteur, et pour que la hauteur du niveau auquel l'eau peut s'élever à l'extrémité des conduites ne soit pas inutilement diminuée, il importe beaucoup d'éviter dans leur intérieur toute saillie formant étranglement ou obstacle au mouvement du liquide, et tout élargissement, et l'on ne saurait apporter trop de soin à l'observation de cette condition.

DU MOUVEMENT DE L'EAU DANS LES AQUEDUCS ET DANS LES CANAUX.

La vitesse de l'eau dans les lits des fleuves et des rivières est infiniment variable : les pentes plus ou moins rapides, les frottements latéraux, les accidents du fond et les sinuosités des rivages sont des causes qui modifient sans cesse la marche des filets liquides, et qui produisent les remous, les tournants et une foule d'autres phénomènes que l'on peut expliquer dans chaque localité, mais qu'il est impossible de calculer d'avance. Les canaux qui ont une pente uniforme, une direction rectiligne et des dimensions constantes présentent des résultats plus simples et plus généraux. Les différentes couches liquides, depuis celle de la surface jusqu'à celle du fond, sont animées de vitesses différentes, et même dans chaque couche les filets des bords et celui du milieu ne peuvent pas avoir la même vitesse à cause de l'adhérence et du frottement qui ont lieu au contact des parois. De tous les filets d'eau qui passent à chaque instant dans la section perpendiculaire d'un canal, celui qui a la plus grande vitesse est le filet qui se trouve à la surface et au milieu du lit à égale distance des deux bords. Cette vitesse maximum peut être déterminée au moyen d'un corps léger que l'on jette sur la surface et qui prend à peu près le mouvement de l'eau. Or, on a constaté par un grand nombre d'expériences que si tous les filets liquides étaient animés d'une vitesse convenue, qui fût les 8 dixièmes de la vitesse maximum, le volume d'eau qui passerait dans un temps donné serait égal au volume d'eau qui passe dans le même temps, en vertu de toutes les vitesses différentes dont les molécules sont réellement animées. Il suffit donc, pour avoir la dépense d'eau d'un canal, de multiplier la surface de sa section par les 0,8 de sa vitesse maximum. Cette règle est très-simple et paraît suffisamment exacte pour la pratique.

Dans toutes les sections que l'on peut faire perpendiculairement au cours d'un fleuve, il passe la même quantité d'eau dans le même temps; car c'est à cette condition que le *régime est établi*, c'est-à-dire que le niveau reste le même à chaque point, sans qu'il y ait tendance à l'accumulation ni à la dépression. Pour connaître la dépense d'un fleuve, il faudrait donc connaître la quantité d'eau qui passe dans une section quelconque. Cela revient à connaître deux choses, savoir : la surface de la section et la vitesse moyenne de tous les filets qui la traversent. Mais la vitesse moyenne n'est plus ici, comme dans les canaux, les 0,8 de la vitesse maximum; et il serait impossible de déterminer en général le rapport qui existe entre elles, puisqu'il suffit d'un rehaussement du fond, d'un creux, d'une sinuosité du rivage, ou même d'une autre cause moins apparente, pour en changer la valeur. Ce qu'il y a de plus simple et de plus exact pour jauger un fleuve, est donc de le faire passer par un pertuis dont on connaisse les dimensions et la profondeur au-dessous du niveau, ou de le faire passer sur une digue où il forme une nappe dont on puisse connaître la largeur et l'épaisseur.

DES RELATIONS ENTRE LA VITESSE A LA SURFACE, LA VITESSE DE FOND ET LA VITESSE MOYENNE DANS UN COURANT OU LA PENTE ET LA SECTION SONT CONSTANTES.

La vitesse du filet d'eau qui est à la surface et au milieu du courant est, à peu de chose près, la plus grande de toutes. La vitesse au fond est la plus petite. On a déjà dit que la vitesse moyenne était celle qui, multipliée par l'aire de la section, donnait la dépense.

Dubuat a fait beaucoup d'expériences dans la vue de rechercher les relations de ces trois vitesses. Il paraît résulter de ces expériences que ces relations ne varient pas sensiblement avec la figure et la grandeur absolue des sections. Cet auteur avait déduit de ses observations des règles de calcul auxquelles M. de Prony en a substitué d'autres, plus simples et plus exactes.

Nommant

U la vitesse moyenne,

V la vitesse à la surface et au milieu du courant,

W la vitesse du fond,

on a sensiblement

$$U = \frac{V(V + 2,73187)}{V + 3,1532}, \qquad W = 2U - V.$$

On peut s'éviter le calcul de la première formule en employant la Table suivante :

VITESSE A LA SURFACE.								
$0^m,00$	$0^m,50$	$1^m,00$	$1^m,50$	$2^m,00$	$2^m,50$	$3^m,00$	$3^m,50$	$4^m,00$
RAPPORT DE LA VITESSE MOYENNE A LA VITESSE DE LA SURFACE.								
0,725	0,786	0,812	0,832	0,848	0,862	0,873	0,883	0,891

Les vitesses dans les expériences sur lesquelles ces résultats sont établis se sont élevées jusqu'à $1^m,30$.

JAUGEAGE DES EAUX COURANTES.

Quand des pertuis ou des barrages peuvent être établis sur les cours d'eau, les formules et les résultats d'expériences données ci-dessus fournissent les moyens d'en jauger les produits. Mais souvent on a besoin de déterminer directement le volume d'eau débité par un canal ou une rivière sans pouvoir recourir à ces règles. Il est donc important de connaître les relations qui existent entre la pente, le profil, la longueur du canal, la vitesse et le volume de l'eau qui le parcourt, soit pour déterminer le produit quand le canal est établi, soit pour proportionner le canal lorsqu'à l'inverse le volume à débiter est donné.

MODE DE JAUGEAGE DES ANCIENS FONTAINIERS.

Pouce d'eau. — Au moyen d'un barrage en planches, ils formaient une retenue, et sur une ligne horizontale ils perçaient un certain nombre de trous, de 12 lignes ($0^m,027$) de diamètre, fermés par des tampons Pour laisser écouler l'eau, on débouchait successivement

un nombre de ces trous suffisant pour que le niveau d'amont se maintînt à 1 ligne ou $0^m,00225$ au-dessus du sommet des trous. L'épaisseur des planches ne devait pas excéder 10 à 12 lignes, afin que l'écoulement ne se fît pas à gueule bée. Lorsque le mouvement de l'eau était parvenu à l'état de régime, c'est-à-dire quand le niveau d'amont était devenu constant à la hauteur ci-dessus indiquée, on estimait le produit de la source par le nombre d'ouvertures débouchées, et le volume fourni par l'une d'elles. Des expériences directes avaient fait connaître qu'un orifice de $0^m,27$ de diamètre produisait, en

24 HEURES.	1 HEURE.	1 MINUTE.	1 SECONDE.
$19^{mc},1953$.	$0^{mc},7998$.	$0^{mc},01333$.	$0^{mc},0002222$.

Ce volume, débité par un seul orifice, est ce que l'on appelait *un pouce de fontainier;* on nommait, par analogie, *ligne d'eau* la 144e partie du pouce d'eau, et *point d'eau* la 144e partie de la ligne d'eau.

On voit que ce mode de jaugeage était peu commode et peu précis: aussi est-il aujourd'hui tout à fait abandonné.

MODE DE JAUGEAGE EMPLOYÉ POUR LES PETITS COURS D'EAU.

Dans le cas des petits cours d'eau, on pratiquera dans le barrage en planches un déversoir à vives arêtes, dont la largeur soit le tiers ou le quart de celle du canal ou réservoir, et alors, lorsque le régime sera établi, c'est-à-dire quand le niveau sera constant, on calculera le produit par la formule

$$Q = 0,400\,LH\sqrt{2gH}.$$

Au lieu d'un déversoir, on pourrait pratiquer un orifice avec charge sur le sommet, muni d'une petite vanne qu'on lèverait, de manière que le mouvement parvînt bientôt à l'état de permanence, et alors on emploierait pour calculer le volume écoulé les règles données précédemment.

RÉSISTANCE DES PAROIS D'UN CANAL AU MOUVEMENT DE L'EAU.

Lorsqu'un liquide se meut dans un canal, les filets voisins de la surface de ce canal éprouvent une certaine résistance, provenant de leur adhérence aux parois et de leur viscosité; ces filets, retardés dans leur marche, ralentissent le mouvement de ceux qui les touchent immédiatement, et de proche en proche on voit que la vitesse doit aller en diminuant de l'intérieur à l'extérieur de la masse fluide. Les parois offrent donc au mouvement du liquide une résistance qui doit retarder sa marche et dont il importe de tenir compte. Coulomb a donné l'expression de cette résistance qui, jusqu'ici, a le mieux représenté les effets naturels. Par des expériences directes, faites pour déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur consistance dans les mouvements très-lents, exécutées au moyen de pendules qu'il faisait osciller dans l'eau, cet illustre ingénieur fut conduit à conclure que cette résistance était proportionnelle à un facteur composé de deux termes, l'un proportionnel à la vitesse, l'autre au carré de cette vi-

tesse. Il est d'ailleurs naturel d'admettre que, pour les canaux et les rivières, cette même résistance est proportionnelle à la densité du fluide ou à la masse du mètre cube égale à $\frac{1000}{g}$ dans le cas de l'eau, au contour ou périmètre mouillé, c'est-à-dire au nombre des filets en contact avec la paroi résistante et à la longueur totale du canal, puisque toutes les résistances partielles opposées par les divers éléments de la paroi doivent s'ajouter.

Si donc on nomme

U la vitesse moyenne dans la section transversale,

S le contour ou périmètre mouillé,

L la longueur du canal de section supposée constante,

la résistance des parois aura pour expression

$$\frac{1000}{g}\,\mathrm{SL}\,(a\mathrm{U} + b\mathrm{U}^2),$$

a et b devant être des facteurs numériques constants pour chaque liquide.

Le chemin parcouru dans l'unité de temps, lorsque le mouvement sera devenu permanent et uniforme, étant U, si l'on continue à supposer tous les filets animés de vitesses égales et parallèles à la vitesse moyenne U, le travail consommé dans chaque seconde par cette résistance sera

$$\frac{1000}{g}\,\mathrm{SL}\,(a\mathrm{U} + b\mathrm{U}^2)\,\mathrm{U}.$$

D'un autre côté, si l'on nomme H la pente totale du lit, et que le mouvement soit parvenu sur toute la longueur considérée à l'uniformité, le travail développé dans l'unité de temps par la gravité sur la masse d'eau M écoulée dans ce temps sera $\mathrm{M}g\mathrm{H}$, et, puisque le mouvement est supposé uniforme, le travail de la puissance doit être égal à celui de la résistance, ce qui conduit à la relation

$$\mathrm{M}g\mathrm{H} = \frac{1000}{g}\,\mathrm{SL}\,(a\mathrm{U} + b\mathrm{U}^2)\,\mathrm{U}.$$

Mais en appelant A l'aire de la section transversale de la masse fluide, le volume écoulé en une seconde est AU, et son poids est

$$\mathrm{M}g = 1000\,\mathrm{AU}.$$

La relation ci-dessus se réduit donc à

$$g\mathrm{H} = \frac{\mathrm{SL}}{\mathrm{A}}\,(a\mathrm{U} + b\mathrm{U}^2).$$

Cette relation entre la pente totale du lit, le périmètre mouillé, la longueur du canal, l'aire de la section, la vitesse moyenne et les coefficients constants a et b, contient la solution des principales questions relatives aux canaux. Mais avant de nous occuper de ses applications, il est bon de faire connaître la marche suivie par M. de Prony pour déterminer les valeurs des nombres a et b, après avoir reconnu que la loi de la résistance était effectivement celle que Coulomb avait déduite de ses expériences.

A cet effet, remarquons que de la relation ci-dessus on tire

$$\frac{gH}{L} \times \frac{A}{SU} = a + bU \quad \text{ou} \quad \frac{H}{L} \times \frac{A}{SU} = \frac{a}{g} + \frac{b}{g}U.$$

Pour des canaux donnés, si l'on a déterminé les valeurs de H, L, S, A et U, on aura dans chaque cas la valeur du premier membre; et si l'on prend (*fig.* 26, *Pl. XIII*) les vitesses U pour abscisses et les valeurs de

$$\frac{gH}{L} \times \frac{A}{SU}$$

pour ordonnées, on voit que, si la loi supposée est exacte, tous les points ainsi déterminés devront se trouver sur une ligne droite qui coupera l'axe des ordonnées à une hauteur égale à a. Quant au second coefficient b, il sera égal à la tangente de l'angle d'inclinaison de cette ligne droite sur l'axe des abscisses, ou au rapport entre la différence de deux ordonnées quelconques, et la différence des abscisses correspondantes.

De cette discussion de toutes les expériences connues jusqu'à cette époque, M. de Prony a conclu que la loi de Coulomb représentait avec une exactitude convenable la marche des eaux courantes, et que les nombres a et b avaient pour valeurs moyennes

$$a = 0{,}000436 \quad \text{ou} \quad \frac{a}{g} = 0{,}0000444499,$$

$$b = 0{,}003034 \quad \text{ou} \quad \frac{b}{g} = 0{,}000309314o;$$

ce qui conduit à la relation pratique

$$\frac{HA}{LS} = 0{,}0000444U + 0{,}000309U^2.$$

M. de Prony a désigné le rapport $\frac{H}{L}$ par la lettre I et l'a nommée la déclivité ou pente par mètre courant, et le rapport $\frac{A}{S}$ par R en l'appelant le rayon moyen, ce qui donne à la formule ci-dessus la forme

$$RI = 0{,}0000444U + 0{,}000309U^2.$$

Usage de cette formule.

Lorsqu'il s'agit de jauger le produit d'un canal ou d'une rivière, on détermine par des nivellements exacts sa pente totale H sur une longueur L où le régime, la profondeur, la largeur et l'aire de la section soient constants autant que possible. On mesure les profils transversaux de la masse fluide, et par le tracé et les méthodes connues on en déduit l'aire moyenne A, le périmètre moyen S et, par suite, le rapport $R = \frac{A}{S}$. Ces quantités étant connues, la formule précédente donne pour la vitesse moyenne

$$U = 56{,}85\sqrt{\frac{AH}{SL}} - 0{,}072.$$

La dépense est ensuite déduite de la relation $Q = AU$.

S'il s'agit, par exemple, d'un canal ayant une longueur $L = 150$ mètres, une largeur de 3 mètres sur une profondeur uniforme de $1^m,10$, $H = 0,075$, on a

$$A = 3,00 \times 1,10 = 3^{mq},3, \quad S = 3,00 + 2 \times 1,10 = 5^m,20,$$

$$\frac{A}{S} = \frac{3^{mq},3}{5^m,20} = 0,635, \quad \frac{H}{L} = \frac{0,075}{150^m} = \frac{1}{2000},$$

et dès lors

$$U = 56,85 \sqrt{0,635 \times \frac{1}{2000}} - 0^m,072$$
$$= 56,85 \times 0,0178 - 0,072 = 0^m,940.$$

Le volume d'eau débité par ce canal est donc

$$Q = AU = 3^{mq},30 \times 0^m,940 = 3^{mc},102.$$

Observation sur ce mode de jaugeage.

Pour pouvoir appliquer la formule précédente, on voit qu'il faut choisir une longueur suffisante de la rivière où le lit soit régulier, de largeur et de profondeur à peu près uniformes, circonstances qui ne se rencontrent qu'assez rarement. Il est, de plus, difficile de déterminer la pente totale d'une manière tant soit peu exacte, à moins que la longueur ne soit considérable. Enfin, lorsqu'il y a de la vase, des inégalités dans le lit, il est fort rare de parvenir à des résultats un peu précis. Cette formule est donc, en général, plus utile pour l'établissement des canaux que pour le jaugeage de leur produit.

DÉTERMINATION DE LA VITESSE MOYENNE. — SA RELATION AVEC LA VITESSE A LA SURFACE.

Le moyen le plus généralement employé et le plus commode pour déterminer le volume d'eau débité par une grande rivière consiste dans l'appréciation de la vitesse moyenne U.

On se sert pour l'estimation de cette vitesse de différents instruments. L'un des plus anciens est le tube de Pitot, qui consiste en un tube de verre ou de métal recourbé à angle droit (*fig.* 27, *Pl. XIII*). On place le tube de manière que sa longue branche soit verticale, et l'on dirige l'autre, qui est horizontale, dans le sens du courant, l'ouverture tournée du côté d'amont. Pitot, d'après les notions qu'il avait sur l'action des fluides, croyait que la hauteur à laquelle le niveau de la branche verticale s'élevait au-dessus de celui du courant était la hauteur due à la vitesse. Mais la forme, la dimension, la position du tube, exercent sur cette dénivellation des influences notables.

Dubuat, en fermant l'embouchure du tube par une platine percée en son milieu d'un petit trou, dit avoir observé qu'alors la hauteur de dénivellation était les $\frac{3}{2}$ de la hauteur due à la vitesse; celle-ci serait donc à l'inverse les $\frac{2}{3}$ de la dénivellation.

D'autres ingénieurs terminent la branche horizontale par une partie conique dont le sommet émoussé est percé d'un petit trou.

Mais il faut des observations plus nombreuses et plus précises que

celles qui ont été faites jusqu'à ce jour pour permettre de fixer exactement les proportions les plus convenables de cet instrument, et le rapport de ses indications avec la vitesse de la portion de fluide dans lequel il est plongé. Ces expériences faciles à faire exigent seulement que l'on ait à sa disposition un canal ou un simple coursier de forme régulière sur une petite étendue, et recevant ou évacuant l'eau par des orifices dont on puisse calculer la dépense par les formules connues.

DIVERS PROCÉDÉS POUR CONNAITRE LE PRODUIT D'UN COURANT D'EAU.

Le procédé le plus direct et le plus exact consiste à faire écouler le courant dans des vases d'une capacité connue, en observant le temps employé pour les remplir; mais cette méthode ne peut être employée que pour des courants dont le produit est fort petit.

Quand le courant offre sur une longueur considérable un état constant, en sorte que la pente, la section et conséquemment la vitesse n'ont pas, dans cet intervalle, de variations sensibles, il suffit d'observer la pente et la section pour pouvoir en conclure la vitesse moyenne et, par conséquent, le produit, comme nous l'avons dit plus haut. Dans une circonstance semblable, on chercherait aussi pour se procurer une vérification, à connaître la vitesse moyenne par l'observation; on y parviendrait en mesurant la vitesse à la surface et au milieu du courant, et en déduisant la vitesse moyenne au moyen des relations indiquées ci-dessus.

On mesure la vitesse à la surface et au milieu du courant par divers procédés :

1°. On observe le temps qu'un flotteur abandonné au courant emploie à parcourir un espace connu;

2°. On observe le nombre de tours que fait, dans un temps connu, un moulinet léger, dont les extrémités des ailes trempent dans le courant et prennent sa vitesse;

3°. On observe l'inclinaison d'un fil à l'extrémité duquel est attaché un corps sphérique, plongé dans le courant;

4°. On présente au choc du courant une petite surface plane qui, en recevant ce choc, fait plier un ressort et mouvoir un index;

5°. On présente au choc du courant un instrument formé d'une petite roue à ailes obliques, dont le mouvement se communique à d'autres roues et fait marcher un index.

Ces divers procédés, à l'exception des deux premiers, exigent que l'instrument ait été étudié d'avance dans des courants dont la vitesse est connue. On omet à dessein de faire mention du tube de Pitot, instrument fondé sur des principes inexacts.

Lorsque les moyens précédents ne peuvent s'appliquer, ou ne paraissent pas suffisamment exacts, on établit dans le lit du courant un barrage dans lequel on pratique un orifice, par lequel on laisse couler l'eau. On attend que l'écoulement soit réglé, c'est-à-dire que l'eau ait pris sur l'orifice la hauteur constante nécessaire pour lui faire dépenser le produit du courant.

On calcule ensuite la dépense au moyen des règles sur l'écoulement des fluides dans des vases.

La meilleure disposition paraît être l'emploi d'un orifice horizontal pratiqué dans une paroi plane et mince; il faut que la distance entre l'orifice et le niveau de l'eau dans le bief inférieur soit égale à 2 ou 3 fois le diamètre de cet orifice (*fig.* 28, *Pl. XIII*), afin que l'écoulement se fasse comme si le fluide jaillissait librement en l'air; ou bien, que le niveau de l'eau dans le bief inférieur soit plus élevé que le plan de l'orifice (*fig.* 29, *Pl. XIII*).

Dans les deux cas, la dépense se calculera par la formule

$$Q = m\Omega\sqrt{2g\zeta},$$

si le fluide peut être considéré comme stagnant au-dessus de l'orifice, et par la formule

$$Q = m\Omega\sqrt{\frac{2g\zeta}{1+\frac{\Omega^2}{O^2}}},$$

s'il y a vitesse sensible dans la section transversale de ce courant en amont de l'orifice.

Dans ces formules, nous avons nommé

ζ hauteur de l'eau dans le bief supérieur sur le plan de l'orifice, si le fluide jaillit en l'air; ou distance des niveaux des deux biefs, si le fluide jaillit dans l'eau;

Ω aire de l'orifice;

O aire de la section transversale du courant en amont de l'orifice;

m coefficient de la contraction;

Q le volume d'eau dépensé dans une seconde;

$g = 9^{m},8088$.

On profite ordinairement, pour jauger le courant d'eau, des barrages établis par les moulins. Dans ce cas, les pertuis des moulins offrent, pour l'écoulement de l'eau, un orifice vertical préparé d'avance, tandis que l'établissement d'un orifice horizontal exigerait une construction spéciale. Cette circonstance peut engager à employer de préférence un orifice vertical (*fig.* 30, *Pl. XIII*), quoique les moyens employés pour calculer le produit paraissent alors plus susceptibles d'erreur. On les éviterait autant qu'il est possible, si l'orifice était pratiqué dans une paroi plane suffisamment étendue pour qu'on pût employer avec exactitude les valeurs données du coefficient de la contraction. Ces valeurs ne pourraient effectivement être employées si le fond de l'orifice ou ses côtés étaient trop peu distants du fond ou des côtés du lit du courant, circonstance qui tend à augmenter le produit.

Si le fluide jaillit dans l'eau, ce qui paraît préférable, le calcul se fait par les formules précédentes, ζ représentant la différence de niveau des deux biefs. Si le fluide jaillit en l'air, il faut employer (l'orifice étant supposé un rectangle dont les côtés sont horizontaux et verticaux) la formule suivante, dans laquelle on conserve les dénominations précédentes, et dans laquelle

b représente la largeur horizontale de l'orifice;

c la charge d'eau sur le côté inférieur de l'orifice;

c' la charge d'eau sur le côté supérieur;

$K = \frac{c + c'}{2}$ la charge sur le centre de l'orifice;

$A = \frac{2}{3}\frac{K}{c - c'}\left[\left(1 + \frac{c}{2K}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(1 - \frac{c}{2K}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$;

$\Omega = b\,(c - c')$.

La formule sera donc

$$Q = \frac{2}{3}\,mb\sqrt{2g}\,(c^{\frac{3}{2}} - c'^{\frac{3}{2}}) \quad \text{ou} \quad Q = Am\Omega\sqrt{2gK},$$

si le fluide est sensiblement stagnant en amont de l'orifice, et

$$Q = Am\Omega\sqrt{\frac{2gK}{1 + \frac{\Omega^2}{O^2}}}$$

dans le cas contraire.

Le facteur A a toutes ses valeurs comprises entre 1 et 0,94.

Les incertitudes qui restent dans les cas ordinaires sur les résultats des calculs précédents, lesquelles tiennent principalement aux variations qu'apportent dans la contraction les diverses figures de la paroi aux environs de l'orifice, ont engagé à proposer un moyen d'évaluer directement le produit. Ce moyen consiste à établir en amont de l'orifice un bassin d'une figure régulière à l'entrée duquel des vannes sont établies. Ayant d'abord laissé affluer l'eau dans ce bassin, et l'écoulement par l'orifice étant devenu constant, on isole subitement en fermant les vannes, le bassin du lit du courant. L'écoulement continuant d'avoir lieu par l'orifice, on observe simultanément les temps écoulés et les quantités correspondantes dont le niveau de l'eau s'abaisse dans le bassin : ces quantités, d'après la forme connue du bassin, donnent immédiatement les volumes d'eau correspondants qui ont été dépensés par l'orifice, en sorte qu'on a une suite de quantités observées simultanément, telles que temps écoulés depuis l'instant où le bassin a été isolé, en secondes T, 2T, 3T, 4T,..., volumes d'eau dépensés en mètres cubes q', q'', q''', q^{IV},....

Le produit Q du courant se calcule alors suivant le nombre des observations simultanées par les formules suivantes :

Une observation :

$$Q = \frac{1}{T}\,q';$$

Deux observations :

$$Q = \frac{1}{T}\left(2q' - \frac{q''}{2}\right);$$

Trois observations :

$$Q = \frac{1}{T}\left(3q' - 3\frac{q''}{2} + \frac{q'''}{3}\right);$$

n observations :

$$Q = \frac{1}{T}\left(nq' - \frac{n(n-1)}{1 \times 2}\frac{q''}{2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{1 \times 2 \times 3}\frac{q'''}{3} \cdots \pm \frac{q^n}{n}\right).$$

On doit faire attention, en employant cette méthode, que la surface de l'eau dans le bassin ne peut en général se maintenir exactement horizontale. Il doit s'y établir une pente du côté de l'orifice. Il faut donc observer simultanément l'abaissement de cette surface dans divers points du bassin, afin de connaître exactement sa figure à chaque intervalle de temps T, et, par suite, les volumes d'eau écoulés après chacun de ces intervalles.

VANNES DE PRISE D'EAU ET DE GARDE.

On établit ordinairement à l'origine des canaux d'usine des vannes de prise d'eau pour régler le volume à admettre dans le canal, volume qui est souvent déterminé par un règlement d'eau. Ce règlement statue que, quand le niveau sera à hauteur d'un repère fixe donné, et habituellement déterminé par l'élévation de la crête d'un déversoir de superficie établi sur le réservoir principal, les vannes ne devront laisser passer qu'un volume d'eau déterminé correspondant à une fraction donnée du produit total connu de la rivière, au moment de l'étiage ou des plus basses eaux. Il faut donc que les orifices de prise d'eau soient disposés et limités de telle sorte qu'il ne puisse pas y avoir abus ou fraude à cette époque, où le produit de la rivière étant au minimum, il importe à chaque partie prenante que les autres ne dépensent que leur part de la force motrice.

Pour pouvoir calculer avec le degré d'exactitude convenable le volume d'eau admis dans un canal en pareille circonstance, il convient d'employer pour les vannes de prise d'eau des orifices noyés avec charge sur le sommet, pour lesquels la dépense se détermine par la formule

$$Q = mLE\sqrt{2g(H-h)}.$$

La différence du niveau $H-h$ du réservoir principal au canal étant d'ailleurs toujours une perte de chute pour l'usine placée sur ce canal, il est de l'intérêt du propriétaire de cette usine de la rendre un minimum. Mais, pour dépenser des volumes un peu considérables, il est difficile de faire $H-h$ plus petit que $0^m,10$ à $0^m,08$ sans tomber dans de trop grandes largeurs ou ouvertures d'orifice. On connaîtra donc le facteur

$$\sqrt{2g(H-h)}.$$

La hauteur E de l'orifice devra être égale à la profondeur d'eau dans le canal de l'usine qui est déterminé par ce qui précède. Par conséquent, de la formule ci-dessus on tirera la largeur

$$L = \frac{Q}{mE\sqrt{2g(H-h)}}.$$

On se rappellera d'ailleurs que, pour atténuer la perte de force vive en aval de l'orifice, il convient de disposer les abords de cette ouverture, de manière que la contraction soit annulée sur le fond et sur les deux côtés verticaux, ce qui, en pareil cas, s'obtient tout naturellement, parce qu'on doit établir le radier à fleur du seuil et les côtés des orifices dans le prolongement des faces des bajoyers ou des piles.

La différence $H-h$ de niveau devant rester constante, on placera

le côté supérieur de l'orifice à la hauteur H — h au-dessous de la crête du déversoir régulateur et du niveau des eaux du canal de l'usine. Il sera d'ailleurs prescrit à l'usine alimentée par le canal de travailler à un niveau constant et affleurant au moins le côté supérieur de l'orifice.

Soit, par exemple,

$$Q = 4^{mc},25, \quad e = 1,00, \quad H - h = 0,10.$$

La contraction étant supprimée sur trois côtés, il semblerait d'abord que l'on dût admettre pour le coefficient ou multiplicateur de la dépense la valeur $m = 0,68$ environ ; mais il faut remarquer qu'ici l'eau coulant dans un canal à pente et section constantes, son mouvement est sensiblement uniforme, la vitesse à peu près la même pour tous les filets et toutes les hauteurs, de sorte que cette vitesse commune est due à la différence des niveaux d'amont et d'aval, ce qui conduit à prendre pour m la valeur 0,526 relative à un orifice analogue au dispositif e, et en interpolant graphiquement entre les résultats des expériences directes, on a alors

$$L = \frac{4,25}{0,526 \times 1 \times 1,40} = 5,771.$$

On pourra partager cette largeur en trois orifices, à chacun desquels on donnerait 1,924, ou en quatre orifices de $1^{m},443$.

Les vannes de prise d'eau à l'origine des canaux, placées sur des rivières sujettes à des crues ou torrentielles, doivent en même temps servir de vannes de garde pour empêcher l'introduction des hautes eaux et des corps flottants. Il faut donc qu'elles aient une fausse vanne formant retenue, dont l'arête supérieure, ainsi que les surfaces des bajoyers et celle des digues environnantes, soit au-dessus des plus hautes eaux. Quelquefois, dans les pays de montagnes où les ruisseaux entraînent des arbres et même des rochers en temps de crues, il sera prudent de faire précéder ces vannages d'une estacade solide en charpente, disposée de manière à rejeter ces corps dans le courant principal.

MOTEURS HYDRAULIQUES.

Force des cours d'eau. — Les règles exposées dans ce qui précède, nous ont donné les moyens de calculer le volume d'eau fourni par le courant ou par la source dont on dispose. Lorsque ce volume de fluide descend du réservoir supérieur au réservoir inférieur qu'on appelle *canal de fuite*, par opposition au premier que l'on nomme *canal d'entrée*, le travail développé par la gravité est, comme on sait, le même, quel que soit le chemin parcouru, quand la différence H des deux niveaux est la même ; et ce travail est égal au produit du poids de l'eau dépensée par la hauteur dont elle est descendue. Il aura donc pour expression

$$1000\,QH,$$

Q étant le volume d'eau dépensée en une seconde, exprimé en mètres cubes, et H la différence des deux niveaux, ou la hauteur de chute.

Ce produit s'appelle le travail absolu fourni par le cours d'eau, et constitue sa valeur vénale. On l'exprime quelquefois en force de

chevaux, en la divisant par 75, et alors la force absolue N d'un cours d'eau, en chevaux, est

$$N = \frac{1000\,QH}{75}.$$

Le parti, l'effet utile qu'on tire d'un cours d'eau à l'aide des récepteurs hydrauliques, dépendant de leur construction, de leur disposition plus ou moins parfaite, il ne serait pas juste de prendre cet effet pour base de la valeur du cours d'eau : c'est le travail absolu qu'il fournit qui doit servir à la fixer.

Récepteurs hydrauliques.

On nomme ainsi toutes les machines dans lesquelles on fait agir l'eau comme puissance motrice, et qui sont destinées à transmettre, à utiliser une portion du travail absolu fourni par le cours d'eau, que l'on doit chercher à rendre la plus grande possible.

Effet théorique des récepteurs hydrauliques.

Pour appliquer à ce genre de machines le principe général des forces vives, nous étudierons ce qui se passe quand elles sont arrivées à un état de périodicité ou d'uniformité de mouvement tel, que la durée d'un certain nombre de tours soit toujours la même. D'après cela, si l'écoulement de l'eau est ainsi parvenu à l'état de permanence, il passera dans chaque période ou dans chaque seconde le même volume d'eau sur le récepteur. Q étant donc ce volume dépensé en une seconde, son poids sera 1000 Q et sa masse $M = \frac{1000\,Q}{g}$. Cela posé, l'eau arrive sur le récepteur avec une vitesse V antérieurement acquise et suivant une direction déterminée, et possède alors la force vive MV^2. Elle rencontre les organes du récepteur ou d'autres masses fluides animées le plus souvent de vitesses moindres, et contre lesquelles, en se choquant, elle perd une certaine portion u de sa vitesse, et par conséquent la force vive Mu^2. Après son introduction, et les tourbillonnements relatifs ayant cessé, elle marche avec le récepteur ou l'abandonne tout de suite; mais, dans tous les cas, elle le quitte avec une autre vitesse W et une force vive correspondante MW^2.

La variation de la force vive éprouvée par le liquide, ou la force vive qui lui a été communiquée, se compose donc de celle qu'il possède à sa sortie du récepteur, diminuée de celle qu'il avait acquise et augmentée de la perte de force vive Mu^2 qu'il a subie en entrant. Elle a donc pour expression

$$MW^2 - MV^2 + Mu^2.$$

Si depuis son point d'introduction jusqu'à celui de sortie, le liquide en se mouvant avec le récepteur est descendu de la hauteur h, le travail developpé par la gravité pour entretenir le mouvement aura pour expression

$$Mgh = 1000\,Qh.$$

Le travail de la résistance utile, ordinairement communiqué par des engrenages ou autres moyens de transmission, peut toujours être assimilé à l'élévation verticale d'un point P agissant tangentiellement

à la circonférence extérieure de la roue, ou du récepteur hydraulique ou de toute autre manière, et qui se mouvrait avec une vitesse moyenne v égale à celle de cette circonférence. Le travail de cette résistance en 1 seconde sera donc exprimé par Pv, et comme il s'oppose à l'accélération du mouvement, il doit être retranché du travail moteur $1000\,Qh$.

D'après cela, le principe des forces vives appliqué aux récepteurs hydrauliques nous donne la relation

$$M(W^2 - V^2 + u^2) = 2Mgh - 2Pv,$$

d'où l'on tire, pour le travail de la résistance qui représente l'effet utile ou transmis,

$$Pv = Mgh + \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}Mu^2 - \frac{1}{2}MW^2.$$

Conditions du maximum d'effet.

L'établissement du récepteur et sa vitesse de marche doivent naturellement être réglés de manière à obtenir le plus grand effet utile; on doit donc chercher à rendre le produit Pv un maximum; et si l'on nomme h' la hauteur due à la vitesse d'arrivée V de l'eau sur le récepteur, on aura

$$V^2 = 2gh',$$

et la relation ci-dessus deviendra

$$Pv = 1000\,Q(h + h') - \frac{1}{2}Mu^2 - \frac{1}{2}MW^2.$$

La hauteur h' est toujours moindre que celle du niveau du réservoir au-dessus du point d'arrivée de l'eau sur le récepteur, puisque l'on sait qu'elle éprouve toujours dans le passage par les orifices et dans sa circulation dans les coursiers ou conduits des pertes de force vive ou de travail. Il suit de là que la somme des hauteurs $h + h'$ sera toujours plus petite que la hauteur de chute totale H du réservoir supérieur au canal de fuite. Toutefois, comme on peut, par de bonnes dispositions des orifices et des conduits ou coursiers, atténuer les pertes ou la différence, on voit que le terme $h + h'$ pourra différer peu de la hauteur totale H, et qu'en tous cas, la plus grande valeur du terme $1000\,Q(h + h')$ sera $1000\,QH$, ou ce que nous avons appelé le travail absolu du moteur ou du cours d'eau.

Quant aux termes $-\frac{1}{2}Mu^2$ et $-\frac{1}{2}MW^2$, relatifs le premier à la perte de force vive que l'eau éprouve à son entrée sur le récepteur, et le second à la force vive avec laquelle elle le quitte et qui n'est pas utilisée, on voit qu'ils correspondent tous deux à un travail perdu qui doit être retranché du travail $1000\,Q(h + h')$, et que, par conséquent, pour rendre l'effet utile Pv un maximum, il faut que ces deux termes soient séparément nuls ou du moins aussi petits que possible; condition qui revient à dire pour le premier de ces termes que l'*eau doit arriver sans choc sur le récepteur*, et pour le second, qu'*elle doit le quitter sans vitesse*.

CLASSIFICATION DES PRINCIPALES VARIÉTÉS DE ROUES HYDRAULIQUES.

Si l'on ne peut réaliser rigoureusement le maximum absolu d'effet utile qui serait égal au travail absolu dépensé par le moteur, on doit au moins, pour chaque espèce de récepteur, chercher à obtenir le plus grand effet qu'il soit capable de produire, et qu'on peut nommer le maximum d'effet relatif. Il faut donc étudier pour chaque genre de moteur hydraulique les conditions sous lesquelles il fonctionne de la manière la plus avantageuse, et consulter les résultats de la théorie et de l'expérience ; nous n'indiquerons ici que les systèmes de récepteurs hydrauliques les plus en usage, et sur lesquels les expériences authentiques ont fourni des résultats bien constatés. Ce sont :

1°. Les anciennes roues à palettes planes qui reçoivent l'eau à leur partie inférieure, et se meuvent dans des coursiers, où elles ont un jeu plus ou moins considérable ; on les nomme *roues en dessous ;*

2°. Les roues à palettes emboîtées dans des coursiers circulaires sur une partie de la chute totale, et qui reçoivent l'eau par des orifices avec charge sur le côté supérieur ;

3°. Les roues à palettes planes emboîtées dans des coursiers circulaires sur toute la hauteur de la chute qui reçoivent l'eau par des vannes en déversoir, et que l'on nomme improprement *roues de côté ;*

4°. Les roues à aubes courbes, imaginées par M. Poncelet, qui reçoivent l'eau à leur partie inférieure et par des vannages inclinés ;

5°. Les roues à augets qui reçoivent l'eau, soit à leur sommet, soit au-dessous de ce point ;

6°. Les roues pendantes montées sur bateaux, qui se meuvent dans un courant en quelque sorte indéfini par rapport à leurs dimensions ;

7°. Les roues à axe vertical, généralement appelées *turbines*.

THÉORIE DE LA RÉSISTANCE DES FLUIDES.

On doit considérer dans la théorie de la résistance des fluides, des phénomènes de trois genres différents :

1°. La réaction exercée contre un vase dont un fluide s'écoule par un orifice ; 2° le choc d'une veine fluide contre un plan ; 3° l'effort exercé contre un corps plongé dans un fluide, quand ce corps est immobile et le fluide en mouvement, ou quand le corps est mû dans un fluide en repos.

De la réaction produite par l'écoulement d'un fluide.

Un fluide s'écoulant hors d'un vase par un orifice dont l'entrée est évasée (*fig.* 3, *Pl.* XIII), ce vase éprouvera dans une direction contraire à celle de la veine fluide qui sort de cet orifice, une pression nommée *force de réaction*. Faisant abstraction de la pesanteur du fluide, et supposant qu'il se meut en vertu d'une vitesse acquise, on considérera le mouvement de chaque filet de fluide, depuis la surface *ab* jusqu'à l'orifice *cd*, comme se faisant dans un canal infiniment étroit. La force de réaction exercée contre le vase sera la somme des pressions exercées contre la paroi de chaque canal, estimée dans la direction de l'axe de la veine, en sens contraire du mouvement du fluide.

Nommons O l'aire de la surface supérieure du fluide supposée horizontale ;

Ω l'aire de l'orifice *ca* ;

U la vitesse à cet orifice ;

θ l'angle de l'axe de la veine sortant de l'orifice *ca* avec la verticale ;

R la force de réaction exercée contre le vase dans la direction de cet axe ;

ρ la densité du fluide.

On verra plus loin que l'expression de la somme susdite est

$$R = \rho\Omega U\left(U - \frac{\Omega U}{O}\cos\theta\right).$$

Si le fluide se meut en vertu de l'action de la gravité, et qu'on conçoive le vase porté sur un plan incliné formant avec la verticale l'angle θ, nommant M le poids du vase et du fluide qui y est contenu, le vase ne tendra à glisser le long de ce plan qu'en vertu de l'effort

$$M\cos\theta - R,$$

et les pressions exercées contre les parois du vase seront toujours telles qu'elles doivent être pour que cette circonstance ait lieu.

Si la direction de la veine est horizontale, $\cos\theta = 0$, et l'on a simplement

$$R = \rho\Omega U^2,$$

ou, si l'orifice est très-petit, ζ représentant la charge sur le centre de cet orifice,

$$R = 2\rho g\Omega\zeta.$$

Si, le vase n'étant pas entretenu constamment plein, l'orifice d'écoulement est très-petit, la quantité de mouvement imprimée au fluide dans l'instant *dt* se réduit à celle de la tranche qui sort dans cet instant, c'est-à-dire $\rho\Omega U\,dt \times U$, on a alors

$$R = \rho\Omega U^2 = 2\rho g\Omega\zeta,$$

comme ci-dessus.

L'expérience est d'accord avec ces derniers résultats, pourvu qu'on évalue convenablement les quantités Ω et U. Si l'entrée de l'orifice n'est point évasée et qu'il y ait contraction, Ω doit représenter la section de la veine contractée, U la vitesse dans cette section, laquelle est due à la hauteur $\frac{\zeta}{1 - \frac{\Omega^2}{O^2}}$, qui se réduit à ζ, si l'orifice est très-petit. Lorsque le fluide s'écoule par un tuyau additionnel cylindrique, Ω doit représenter la section de ce tuyau et U la vitesse dans cette section, laquelle est communément

$$0,82\sqrt{2g\zeta}.$$

Du choc d'une veine fluide contre un plan.

On considérera une veine de fluide, jaillissant hors d'un orifice, et on recherchera la pression résultant du choc de cette veine contre un plan qui s'opposerait à son mouvement. Pour résoudre convenable-

ment cette question, il faut d'abord concevoir un filet de fluide se mouvant dans un canal, et chercher la pression qui s'exerce en vertu de ce mouvement et suivant une direction déterminée contre la paroi du canal.

Soit AmM un canal de figure quelconque (*fig.* 32, *Pl. XIII*), dans lequel se meut un fluide, de la pesanteur duquel on fait abstraction; considérant le mouvement du fluide dans l'intervalle AM, il s'agit de trouver la pression qui s'exerce dans cet intervalle contre la paroi du canal, dans le sens de la ligne AB qui est tangente en A à la directrice de ce canal; nommant

o l'aire de la section du canal en A,
ω l'aire de la section quelconque m,
S la longueur d'une portion quelconque Am du canal,
U, u, u' les vitesses du fluide en A, m et M,
θ, θ' les angles que les tangentes en m et en M font avec AB,
r le rayon de courbure en m,
ρ la densité du fluide;

et considérant la tranche placée en m, on observe que la pression que cette tranche exerce est le résultat de deux forces, savoir : celle qui produit la variation de sa vitesse, et sa force centrifuge. La première force qui agit dans la direction de la courbure du canal est

$$\rho\omega\, ds\, \frac{du}{dt} = \rho\Omega U\, du,$$

et, décomposée dans le sens AB, elle est

$$-\rho\Omega U\, du \cos\theta.$$

La force centrifuge qui est dirigée suivant la normale a pour valeur

$$\rho\omega\, ds\, \frac{u^2}{r} = \rho\omega u^2\, d\theta = \rho\Omega U u\, d\theta;$$

la composante de cette force, suivant AB, est

$$\rho\Omega U u\, d\theta \sin\theta.$$

La pression totale exercée sur la tranche, dans le sens AB, est donc

$$\rho\Omega U\,(u\, d\theta \sin\theta - du \cos\theta);$$

puis enfin il vient

$$\rho\Omega U\,(U - u' \cos\theta')$$

pour la valeur complète de la pression cherchée. Cette valeur ne dépend que des vitesses du fluide aux deux points extrêmes de la portion du canal que l'on considère, et de l'angle que forment en ces points les tangentes à sa direction. Elle a également lieu, soit que le mouvement du fluide varie ou non avec le temps.

Considérons maintenant une veine de fluide jaillissant hors d'un orifice, supposons que Ω représente la section de la veine contractée (*fig.* 33, *Pl. XIII*) et U la vitesse à cette section. Imaginons qu'un plan est opposé directement au mouvement de cette veine, et que le fluide cesse d'agir sur le plan aussitôt que tous les filets ont pris des directions parallèles à ce même plan, on pourra concevoir le mouvement de chaque filet de fluide comme ayant lieu dans un canal semblable à

celui considéré ci-dessus. La pression supportée par le plan sera la somme des pressions exercées dans tous les canaux, dans le sens de l'axe de la veine.

La formule précédente donnera, pour la valeur de cette somme,

$$\rho\,\Omega\,U^2 \quad \text{ou} \quad \rho g\,\Omega\,2\zeta,$$

ζ étant la hauteur due à la vitesse. Cette valeur est la même que celle que nous avons trouvée pour la réaction exercée contre le vase. Concevant en effet que l'axe de la veine est horizontal, que le plan vertical qu'elle vient frapper est lié au vase, et observant que le système ne peut se procurer de mouvement dans le sens horizontal, on jugera que la force de réaction et la force du choc doivent être égales.

Le résultat précédent s'accorde avec l'expérience, pourvu qu'on estime convenablement U et Ω, comme on l'a indiqué ci-dessus; que le plan ait une grandeur suffisante pour que les filets en cessant d'agir sur lui aient pris des directions qui lui soient parallèles; et enfin que ce plan ne soit pas assez près de l'orifice pour gêner l'écoulement du fluide. On a fait abstraction de l'action de la pesanteur sur le fluide. Cette action ne peut influer sensiblement sur les résultats, surtout si la direction de la veine est horizontale.

Lorsque le choc de la veine s'exerce contre un plan qui ne lui est pas directement opposé, mais qui fait un angle θ' avec l'axe de cette veine, la formule précédente ne donne plus de solution, parce qu'en admettant toujours les hypothèses ci-dessus, il faudrait connaître la vitesse u' du fluide à l'instant où sa direction est parallèle au plan et où il cesse d'agir sur lui.

On s'éloigne alors peu des effets naturels, en supposant que la pression exercée normalement contre le plan est exprimée par

$$\rho\,\Omega\,U^2 \sin\theta'.$$

Cette expression est celle qu'on trouverait en prenant pour la pression dont il s'agit la force nécessaire pour détruire dans le fluide le mouvement qu'il possède dans le sens du plan.

De la résistance des fluides dans le cas d'un corps plongé dans un fluide indéfini.

Ayant un corps immobile plongé dans un courant de fluide d'une largeur et d'une profondeur indéfinies, il s'exerce contre ce corps un effort qui est dû en général à deux causes : au choc du fluide contre la face antérieure du corps, et à l'inégalité des pressions résultant du poids du fluide, qui s'exercent contre les faces antérieures et postérieures.

MN (*fig.* 34, *Pl.* XIII) étant la direction du mouvement du fluide, les filets prennent, à la rencontre du corps, dont AB est la face antérieure, des directions telles que *mon*, lesquelles sont partagées par le point d'inflexion *o* en deux parties; l'une *mo*, qui présente sa convexité au corps; l'autre *on*, qui lui présente la concavité. En parcourant la portion *mo*, le fluide exerce contre le corps, dans le sens MN, une pression représentée par la formule

$$\rho\,\Omega\,U\,(U - U'\cos\theta).$$

Si l'on fait la somme de ces pressions pour tous les filets de fluide

que la présence du corps oblige à se détourner de leur direction rectiligne primitive, on aura l'effort supporté par le corps par l'effet du choc du fluide. Lorsque les filets du fluide parcourent les portions *no* de leurs courbes, le corps ne ressent aucune action par suite de leur mouvement, cette action étant supportée par le fluide environnant.

L'effort résultant du chõc est donc exprimé par la somme des quantités, telles que

$$\rho\Omega U(U - U' \cos \theta'),$$

U représentant la vitesse naturelle du courant; U' la vitesse en ρ; θ' l'angle de la tangente en ρ avec la direction du courant; Ω la section de chaque filet du fluide.

L'étude des phénomènes indique : 1° que quand U varie, U' varie dans le même rapport; 2° que pour plusieurs corps de figures semblables, les figures formées par les filets de fluide, déviées de leurs directions, lesquelles ne changent point avec la vitesse du fluide, sont aussi semblables. Il en résulte : 1° que l'effort résultant du choc est proportionnel à U^2; 2° que cet effort est pour des corps de figures semblables proportionnel au carré de leurs dimensions homologues.

Quant aux effets de sa pression produits par le poids du fluide (*fig.* 35, *Pl. XIII*), on remarque que le mouvement d'un fluide pesant, coulant uniformément dans un canal, doit être assimilé à celui du fluide dans un tuyau dont la pente serait uniforme, unissant deux vases où il y aurait sur les sections extrêmes de ce tuyau une hauteur de fluide égale à la hauteur due à la vitesse dans le tuyau. Mais alors, nommant u la vitesse qui a lieu en m (laquelle peut être ou plus grande ou plus petite que la vitesse moyenne U qui a lieu dans le tuyau), la hauteur due à la pression en m sera exprimée d'après la formule

$$\frac{u^2}{2g} \text{ ou par } \frac{u^2 - U^2}{2g}.$$

Si l'on conçoit donc que u représente la vitesse du fluide coulant le long d'un point quelconque de la surface du corps, la formule précédente exprimera la hauteur due à la pression exercée en ce point contre cette surface.

Or si, pour la face antérieure et pour la face postérieure du corps, on évalue pour chaque point les pressions susdites, qu'on les décompose dans le sens du mouvement du fluide, et qu'on les ajoute, les termes fournis par les distances *mn* de chaque point à la surface du fluide disparaîtront dans la somme, et il ne restera que des termes fournis par les quantités $\frac{u^2 - U^2}{2g}$. Si l'on continue à admettre que u varie proportionnellement à U, on en conclura que la somme dont il s'agit sera encore pour un même corps proportionnelle à U^2, et pour des corps de figure semblable proportionnelle au carré de leurs dimensions homologues.

Les considérations précédentes conduisent à admettre que l'effort exercé sur le corps, en vertu du mouvement du fluide, doit avoir pour expression générale

$$\Pi(m + n)\Omega H,$$

en nommant Π le poids de l'unité de volume du fluide ; Ω l'aire de la plus grande section transversale du corps ; $H = \frac{U^2}{2g}$ hauteur due à la vitesse du fluide ; m, n coefficients numériques constants pour des corps de figures semblables, variables pour diverses figures, lesquels doivent être donnés par l'expérience.

L'expérience est d'accord avec ce résultat, sauf diverses modifications dont on va parler. Ce même résultat s'applique également au cas où le corps est mû dans le fluide, H représentant la hauteur due à la différence des vitesses. Mais alors les coefficients m, n, peuvent avoir d'autres valeurs. Il faut concevoir que le coefficient m se rapporte à l'effet produit du choc et de la pression contre la face antérieure, et le coefficient n à l'effet du défaut de pression contre la face postérieure, par suite duquel le corps est comme tiré dans le sens du mouvement du fluide.

Les modifications dont les conclusions précédentes sont susceptibles dépendent : 1° de l'adhésion des molécules du fluide ; elle produit des effets sensibles quand la vitesse est très-faible et le corps très-petit ou très-allongé : alors il faut, pour représenter les effets naturels, ajouter un terme proportionnel à la première puissance de la vitesse ; 2° de l'élasticité du fluide, quand le corps est plongé dans l'air : comme dans un fluide élastique la densité croît avec la pression, la densité du fluide contre la face postérieure augmente avec la vitesse ; cette circonstance fait croître la résistance dans un rapport plus grand que celui du carré de la vitesse ; cet effet ne devient sensible que pour des vitesses très-considérables ; 3° de la distance du corps à la surface du fluide, lorsqu'il se meut dans l'eau : lorsque le corps est très-près de cette surface, il éprouve une résistance plus grande, parce que l'eau ne se détourne pas et ne se relève pas avec la même facilité ; si le corps est flottant, le fluide éprouve autour de lui une dénivellation dont l'effet est d'augmenter la pression contre la face antérieure, de la diminuer contre la face postérieure, et de faire croître la résistance plus rapidement que le carré de la vitesse ; 4° enfin, de valeurs extrêmes attribuées à la vitesse. On peut toujours concevoir une vitesse assez grande pour que la valeur de la pression exercée contre la face postérieure du corps devienne négative. Alors le fluide ne touche plus cette face. La résistance est produite par le choc sur la face antérieure, et par la pression résultant du poids du fluide exercée contre cette face. Son expression change entièrement de nature.

Les considérations précédentes donnent une idée générale de la nature de la résistance des fluides et de la manière dont on peut l'évaluer, il reste à exposer ce que l'observation a appris sur la valeur absolue de la résistance pour divers corps.

Des plans minces.

Considérant un plan mince choqué directement par le fluide, et l'effort qu'il supporte étant exprimé par la formule $\Pi(m+n)\Omega H$ où Ω exprime l'aire de ce plan, le coefficient $m+n$ augmentera avec Ω. Il est à peu près égal à 1,4 quand $\sqrt{\Omega} = 0^m,1$, et il égale 1,9

quand $\sqrt{\Omega} = 0,32$. On ignore sa valeur pour de plus grandes surfaces.

Lorsque le plan est mû dans un fluide en repos, on a, d'après les expériences de Dubuat, $m + n = 1,43$ quand $\sqrt{\Omega} = 0,32$. Mais la grande différence de ce résultat avec le précédent peut faire naître quelques doutes.

Des corps prismatiques.

Pour un corps prismatique terminé par deux faces planes, la pression exercée contre la face antérieure est sensiblement constante. La non-pression exercée sur la face postérieure diminue à mesure que le prisme est plus long. Quand le corps en repos est choqué par le fluide, on a environ :

quand la longueur est égale à $\sqrt{\Omega}$ . . . $m + n = 1,46$.

quand la longueur est égale à $3\sqrt{\Omega}$ ou à $6\sqrt{\Omega}$. . $m + n = 1,34$.

Quand la longueur est plus grande, $m + n$ augmente par l'effet du frottement du fluide sur les faces latérales du corps.

Lorsque le corps est mû dans un fluide en repos, on a seulement :

quand la longueur est égale à $\sqrt{\Omega}$ . . . [illegible]

quand la longueur est égale à $3\sqrt{\Omega}$ ou à $6\sqrt{\Omega}$. . $m + n = 1,10$.

Des corps prismatiques garnis de proues ou de poupes.

Une poupe ajoutée à un corps prismatique dont la longueur égale de 4 à 5 fois la largeur, ne diminue la résistance que de $\frac{1}{6}$ environ. Elle la diminue d'autant plus qu'elle est plus longue et plus aiguë.

Ajoutant à un bateau prismatique une proue formée de deux plans verticaux, dont la saillie égale la largeur du bateau, la résistance est réduite à environ moitié. La base de la proue étant un demi-cercle, on a à peu près la même diminution. Cette base étant un triangle dont la longueur est double de la largeur, la résistance est réduite aux $\frac{2}{5}$. A saillie égale, les proues dont la base est un triangle mixtiligne, sont celles qui diminuent le plus la résistance. Une proue formée du prolongement des faces latérales du bateau coupées en dessous par un plan incliné de $\frac{1}{3}$ d'angle droit réduit la résistance aux $\frac{2}{3}$.

D'une sphère.

Pour une sphère mue dans l'eau ou mue dans l'air avec une vitesse médiocre, la valeur du coefficient $m + n$ est 0,6. Quand la sphère est mue dans l'air, cette valeur augmente avec la vitesse, à peu près comme l'indique le tableau suivant :

U	25m	50m	100m	200m	500m
$m + n$	0,69	0,70	0,72	0,81	1,04

Dans un corps ayant la figure d'un vaisseau.

Les expériences de Bossut sur un modèle de vaisseau mû dans le sens de son axe donnent à peu près pour ce corps $m + n = 0{,}16$. On peut présumer que cette valeur surpasse peu celle qui conviendrait au corps offrant la moindre résistance possible.

MOYENS EMPLOYÉS POUR FOURNIR DE L'EAU A UNE VILLE.

Pour fournir de l'eau à une ville, il faut examiner s'il existe dans les environs des sources, ruisseaux ou rivières, dont les eaux, saines et abondantes, peuvent arriver, avec une pente convenable, sur les points les plus élevés du sol et être distribuées dans toute son étendue, ou bien, si l'on doit avoir recours aux machines, afin d'élever les eaux au-dessus de leur niveau naturel. Bien souvent il est possible d'employer l'un ou l'autre de ces moyens, et le choix doit dépendre de la *qualité des eaux*, de la *sûreté de la distribution* et de l'*économie dans la dépense*.

Qualité des eaux. — Il est indispensable de s'assurer si les eaux sont salubres et propres à tous les besoins de l'économie domestique. On peut les regarder comme bonnes à boire lorsqu'elles sont vives, limpides, sans odeur; qu'elles cuisent bien les légumes; qu'elles dissolvent le savon sans donner lieu à des grumeaux; qu'elles ne sont fortement troublées ni par le nitrate de baryte, ni par le nitrate d'argent, ni par l'oxalate d'ammoniaque; et qu'enfin, évaporées jusqu'à siccité, elles ne laissent qu'un faible résidu.

Sûreté de la distribution. — Les canaux creusés en terre ont de nombreux inconvénients sous le rapport de la sûreté de distribution : ils sont exposés à être dégradés par la malveillance, par l'intempérie des saisons et les filtrations; de plus, ils font éprouver une perte d'eau par l'évaporation au moment où les sources sont le moins abondantes. On doit par conséquent leur préférer les aqueducs ou les machines. Les aqueducs peuvent être construits avec solidité, et les machines peuvent se multiplier de manière à n'avoir à craindre aucune interruption.

Le canal de l'Ourcq a été construit avec beaucoup de soin, et l'on n'a rien épargné pour rendre les berges parfaitement étanches. Cependant, non-seulement il y a encore beaucoup d'infiltrations, mais il arrive assez fréquemment des avaries qu'on ne peut réparer qu'en interceptant tout à fait l'écoulement des eaux. De là des réclamations de la part des concessionnaires. Que serait-ce si l'approvisionnement de Paris dépendait uniquement de l'arrivée de ces eaux?

Économie dans la dépense. — Les frais que peuvent occasionner l'ouverture d'un canal ou la construction d'un aqueduc en maçonnerie dépendent des obstacles naturels résultant de la situation des ouvrages, de la distance à laquelle il faut prendre les eaux et du volume auquel il s'agit de fournir un écoulement. L'évaluation de ces dépenses ne peut pas être soumise à une règle générale; mais on peut reconnaître que, dans chaque cas particulier, elles varient avec le volume. La section d'eau vive est, en effet, proportionnelle à la dépense d'eau, la vitesse restant la même. Or, tout changement dans

cette section en entraîne un dans le travail du canal, puisqu'on ne peut l'obtenir qu'en augmentant la profondeur d'eau, ce qui exige qu'on l'enfonce davantage, et qu'on donne plus d'épaisseur aux digues, ou bien en élargissant le fond de la cuvette, ce qui produit également une augmentation dans le cube des ouvrages. Dans l'un et l'autre cas cette augmentation n'est pas exactement proportionnelle à la section; elle croît dans un moindre rapport.

Lorsqu'on emploie des machines, la dépense est au contraire proportionnelle au volume d'eau à fournir, parce que la valeur d'une machine est sensiblement proportionnelle à sa force ou au nombre de chevaux de vapeur qui l'exprime, et qu'un même poids de charbon doit développer le même nombre d'unités dynamiques, quelle que soit la puissance de cette machine.

Il résulte de cette différence dans le rapport d'accroissement de la dépense, selon qu'on emploie un canal ou des machines, qu'il y a dans chaque cas particulier un certain volume d'eau pour lequel il est indifférent d'employer un canal de dérivation ou des machines à vapeur; et que, suivant que le volume d'eau se trouve au-dessus ou au-dessous de cette limite, il vaut mieux employer l'un ou l'autre de ces deux systèmes.

DISTRIBUTION DES EAUX.

La distribution des eaux a pour but de les faire circuler; pour cela, on distingue le point de départ ou *la prise d'eau*, *la conduite* et le point d'arrivée ou *le dégorgement*.

La prise d'eau peut se faire : 1° dans une rivière au moyen d'une pompe; 2° dans un réservoir alimenté par des machines ou par un aqueduc; 3° enfin sur une conduite principale pour former un branchement.

La conduite se compose de plusieurs parties : de *tuyaux* qui peuvent différer et par la matière dont ils sont formés et par le mode d'assemblage; de *robinets* qui servent à intercepter ou à rétablir l'écoulement des eaux, et de *ventouses* qui donnent une issue à l'air, afin que sa présence dans la conduite ne gêne pas le mouvement de l'eau et ne tende pas à diminuer le produit de l'écoulement.

Le dégorgement présente une grande variété d'effets. On peut faire servir les eaux à l'embellissement des places et des promenades en les forçant à se répandre en nappes, à tomber en cascades, etc. On peut les faire concourir à la salubrité par le lavage des rues et des égouts, ou les employer aux divers usages de la vie en les distribuant à domicile.

Prise d'eau.

Lorsque les eaux que l'on veut distribuer dans une ville sont amenées sur le point le plus élevé du sol par un canal de dérivation ou par un aqueduc, on les réunit ordinairement dans un réservoir, et c'est là que se font les prises d'eau qui doivent alimenter les conduites.

Mais lorsque les eaux sont élevées par des machines, il se présente alors deux systèmes :

1°. Celui d'un réservoir supérieur.

2°. Celui dans lequel les pompes aspirantes et foulantes poussent

directement l'eau dans les tuyaux de conduite, et surmontent les résistances qui se développent dans le mouvement par les pressions que les pistons des pompes exercent sur la colonne d'ascension.

Le premier système rend la distribution plus sûre et la marche des machines plus régulière.

Le second procure une grande économie dans les premiers frais d'établissement, et même dans l'emploi des forces motrices, si les quartiers à desservir sont à des hauteurs très-différentes les unes des autres. Il est donc essentiel de comparer leurs avantages et leurs inconvénients respectifs.

Pour que la distribution soit sûre, il faut que la force motrice exerce une action suffisante pour imprimer à l'eau sa vitesse; on peut mesurer cette force par une colonne d'eau dont la hauteur est calculée d'avance, et doit rester constamment la même. Si le *produit* des conduites diminue, on ne peut alors l'attribuer qu'à des *fuites*, et rien n'empêche d'y porter remède. Si l'eau n'arrive pas, au contraire, avec la même abondance au réservoir, c'est que la machine ne développe plus le même *effet utile*. On peut reconnaître si cela tient à un dérangement dans le mécanisme, ou à la qualité du charbon, ou à la négligence du chauffeur, etc.

Pour que la marche d'une machine soit régulière, il faut que les résistances à vaincre, que l'effort à produire, n'éprouvent aucune variation; cela n'aurait pas lieu si l'on supprimait le réservoir alimentaire. La marche de la distribution ferait changer successivement le développement des conduites remplies d'eau, et, par suite, les frottements; la fermeture subite des robinets produirait des *coups de bélier* dont l'effet se ferait nécessairement sentir sur tous les points; l'effort devrait être plus ou moins considérable, suivant qu'il y aurait plus ou moins d'air dans les tuyaux. Enfin, il serait difficile d'obtenir un mouvement uniforme et continu.

C'est par ces considérations que l'on a adopté jusqu'à présent l'établissement de vastes réservoirs qui tiennent constamment les conduites en charge. Il est bon de remarquer cependant que dans l'établissement de Chaillot l'eau est portée à 37 mètres au-dessus de l'étiage de la Seine, tandis que les quartiers qu'elle doit alimenter ne sont élevés que de 10 à 15 mètres au-dessus de ce même niveau; cette disposition occasionne une grande perte de *forces motrices*, puisque la vitesse de l'eau, au moment où elle arrive dans un bassin de fontaine, est tout à fait inutile, et elle serait entièrement vicieuse s'il n'en résultait pas une diminution dans la grosseur des tuyaux de conduite. Mais cette compensation est illusoire, parce qu'il y a des limites *minimum* dans la grosseur des diamètres qu'il ne faut pas dépasser, de manière que le prix des conduites reste toujours le même, quel que soit l'excès de la hauteur des réservoirs.

La considération de la dépense est d'une trop grande importance, lorsqu'il s'agit d'une distribution générale d'eau, pour qu'on ne doive pas chercher à éviter l'inconvénient que nous venons de signaler, et c'est ce qui nous engage à examiner avec attention s'il ne serait pas convenable de supprimer entièrement les réservoirs, en trouvant le moyen d'obtenir la même régularité. On ne pourrait le faire qu'en

ayant la possibilité de régler les pressions que les pistons des pompes exercent sur l'eau des tuyaux d'ascension, il est toujours facile, au moyen d'un instrument, d'avoir la mesure immédiate de la pression que l'eau éprouve dans un tuyau de conduite, et, par suite, celle de la hauteur à laquelle elle devra s'élever ; mais il est plus difficile de faire varier la pression d'après la hauteur des quartiers où l'on veut distribuer l'eau, de manière qu'aux heures déterminées du jour l'appareil qui sert de mesure à la pression marque celle que l'on veut obtenir. Cette opération délicate est confiée au *chauffeur*; il pousse ou ralentit la machine à vapeur, soit en ouvrant plus ou moins le robinet de *mise en train* qui donne passage à la vapeur qui agit sur le piston, soit en activant le feu pour augmenter la température et la tension de la vapeur.

Le rapport entre la pression de la vapeur d'eau et les élévations de température est indiqué par le tableau suivant :

TEMPÉRATURE de la vapeur.	PRESSION de la vapeur.
100 degrés	1
121,35	2
135,00	3
144,95	4
153,30	5
160,00	6
166,42	7
172,18	8

Par conséquent, si l'on a besoin dans quelques cas d'agir avec de la vapeur à cinq atmosphères, il faut : ou que la température soit constamment à 153°,30, et alors, pour agir à des tensions plus faibles, on n'a qu'à diminuer l'ouverture du robinet de mise en train ; ou que le chauffeur augmente dans ce cas particulier l'action du feu, et alors la marche de la machine dépend uniquement de sa surveillance. Dans la première supposition, il y a perte de forces motrices ou de combustible ; dans la seconde, peu de sûreté dans la distribution, ce qui présente également des inconvénients.

On peut conclure de ce qui précède, que lorsque les hauteurs des quartiers à desservir varient de beaucoup entre elles, comme à Paris, où la différence peut être de 10 à 40 mètres, il convient d'adopter des systèmes de conduites indépendants entre eux, et de les alimenter par des réservoirs placés à des hauteurs différentes.

Un autre motif, en faveur des réservoirs, c'est que, lorsque les conduites se vident par l'effet de la distribution, l'air atmosphérique y remplace de suite l'eau, et lorsqu'on veut les remettre en charge, il devient très-difficile de chasser cet air, qui met un obstacle à l'écoulement de l'eau, en même temps qu'il interrompt la marche régulière des machines.

Ces réservoirs offrent, de plus, des ressources en cas d'incendie, puisque, en les adoptant, non-seulement les conduites restent pleines, mais on y trouve une réserve qui permet d'attendre qu'on élève une nouvelle quantité d'eau.

Prise d'eau dans un réservoir. — La prise d'eau dans un réservoir se fait au moyen d'un tuyau de fonte de fer recourbé à angle droit, et incrusté dans le massif de la maçonnerie. On règle l'écoulement de l'eau par une *bonde* qui ferme hermétiquement l'orifice du tuyau, lorsqu'elle est baissée, et dont la manœuvre se fait, ou par une vis ou par un levier coudé qui porte à son extrémité une gorge circulaire dans laquelle s'enroule la chaîne fixée à l'axe vertical de la bonde (*fig.* 36 et 37, *Pl. XIV*).

Prise d'eau sur une conduite. — La prise d'eau sur une conduite se fait au moyen d'un tuyau qu'on ajuste sur une tubulure qu'on a réservée à cet effet (*fig.* 38 et 39, *Pl. XIV*), ou plus ordinairement sur un orifice circulaire ouvert dans la paroi de la conduite principale. Dans ce dernier cas, le tuyau de prise d'eau est fixé sur la conduite par un *collier à lunette* que l'on arrête au moyen de vis, après avoir interposé une rondelle de cuir gras (*fig.* 44, 45 et 46, *Pl. XV*).

Lorsque le branchement a un très-petit diamètre, on se contente de le visser sur la conduite principale (*fig.* 47, *Pl. XV*).

Chaque tuyau de prise d'eau est garni d'un robinet au moyen duquel on peut suspendre, à volonté, l'introduction de l'eau dans le tuyau de branchement.

Conduite.

Les ouvrages principaux qui entrent dans la composition d'une conduite sont les tuyaux, les robinets et les ventouses.

Des tuyaux. — La durée du plomb, la facilité que l'on a de faire varier la forme des tuyaux, de les réunir au moyen de soudures, a fait adopter les tuyaux en plomb; mais comme les distributions d'eau exigent, le plus souvent, des conduites d'un grand diamètre, on reconnut que leur emploi entraînait dans des dépenses considérables, et l'on chercha à y substituer la fonte en fer. C'est aujourd'hui la matière la plus généralement adoptée; on ne se sert du plomb que pour les raccordements et les extrémités des branchements particuliers qui portent l'eau dans les édifices ou qui la distribuent dans l'intérieur des fontaines, parce qu'il se prête à toutes les inflexions.

Formule qui sert à régler l'épaisseur des tuyaux. — Désignons par e l'épaisseur d'un tuyau de conduite, par r le rayon du tuyau, par P la pression normale qu'il éprouve, rapportée à l'unité de surface, et par R′ la plus grande tension que l'on veut faire supporter aux fibres sur cette unité superficielle.

On ne changera rien à l'état d'équilibre si, au moment de la rupture, on suppose que le tuyau est séparé en deux par une paroi fixe dirigée suivant un diamètre.

La pression que le liquide exerce sur cette paroi est exprimée par $2Pr$. La résistance qui s'opère aux points de contact est exprimée par $2eR'$. On a donc

$$eR' = Pr$$

pour l'équation qui servira à régler l'épaisseur des tuyaux.

La quantité R′ dépend de la matière dont le tuyau est formé et est toujours donnée par l'expérience.

La quantité P exprime la pression normale que le tuyau éprouve,

rapportée à l'unité de surface. Elle est donc variable. Mais comme les tuyaux sont exposés, par la fermeture subite des robinets, à des coups de bélier, dont l'effet se développe en raison de la masse liquide en mouvement, multipliée par le carré de la vitesse, il faut que ces tuyaux puissent supporter une pression considérable que l'on constate par un essai avant l'emploi. Il s'ensuit que P doit être également regardé comme constant dans l'équation.

Par conséquent, l'épaisseur des tuyaux est simplement proportionnelle à leur diamètre, et le poids qui constitue la dépense augmente comme le carré de ces diamètres.

Des différents modes de distribution des eaux.

On distingue deux modes de distribution des eaux : dans le premier, les eaux sont portées directement au centre des quartiers que l'on veut approvisionner, par des dérivations que l'on rend indépendantes les unes des autres, en affectant à chacune d'elles une conduite particulière.

On choisit, autant que possible, pour centre le point le plus élevé au-dessus du sol adjacent, et l'on termine la conduite par une fontaine monumentale, dont le bassin inférieur devient une cuvette de distribution pour le service des bornes d'arrosement établies dans les rues environnantes. La détermination du diamètre de chaque conduite n'offre dans ce cas aucune difficulté : on connaît le volume d'eau qui doit alimenter la fontaine, la distance qui la sépare du réservoir et la différence de niveau entre les deux points extrêmes, d'où résulte la charge motrice ; il ne reste plus qu'à faire une application simple de la formule du mouvement uniforme.

Le second mode de distribution s'applique plus spécialement au service des concessions particulières. Il se compose d'un tuyau principal qui part du réservoir et suit, autant que possible, la ligne milieu de l'arrondissement à desservir. Sur ce tuyau sont branchés d'autres tuyaux répartiteurs qui parcourent les rues les plus populeuses et les plus importantes. Ces conduites secondaires sont accompagnées de tuyaux dits de service, qui leur sont parallèles, ou qui se dirigent vers les rues où il ne se trouve aucun tuyau répartiteur. Ils forment un réseau qui embrasse toutes les rues du quartier que l'on considère. Ce n'est que sur les tuyaux de service qu'on branche ceux des particuliers, lesquels viennent aboutir à des réservoirs placés aux différents étages des maisons.

Diamètre des tuyaux. — Hauteur de chaque réservoir. — Les éléments qui influent sur les diamètres des tuyaux, sont : 1° les différentes hauteurs auxquelles il faut élever les eaux ; 2° le nombre et l'emplacement des prises d'eau ; 3° le volume d'eau à débiter ; 4° la durée de l'écoulement.

Les différentes hauteurs auxquelles il faut élever les eaux dans Paris, dépendent des hauteurs respectives de ses différents quartiers au-dessus du niveau de la Seine, or on voit sur le nivellement général qui en a été fait, que tous les quartiers inférieurs ne sont élevés que de 10 à 15 mètres au-dessus de l'étiage de la Seine ; que sur la rive droite, les points les plus élevés se trouvent, du côté de Ménilmon-

tant, à 34 mètres, et, du côté de Montmartre, à 39 mètres au-dessus du même niveau; enfin, que sur la rive gauche le point culminant est à 36m,659. Il faut ensuite ajouter à ces différentes cotes la hauteur à laquelle on veut que les eaux jaillissent au-dessus du sol, soit pour l'embellissement des fontaines, soit pour les distributions intérieures dans les maisons, ainsi que la hauteur ou charge nécessaire pour imprimer à l'eau le mouvement et vaincre les résistances. Cette dernière hauteur ne peut se déterminer que par le calcul; et c'est leur somme qui fixera la hauteur des réservoirs alimentaires, ou qui donnera la mesure de la pression à exercer par les machines à vapeur.

La position des prises d'eau n'est pas arbitraire. Moins l'eau a de distance à parcourir pour arriver à sa destination, plus les résistances sont faibles, et plus aussi on peut diminuer la force motrice ou la grosseur des tuyaux, ce qui détermine, dans tous les cas, une réduction dans la dépense. Il faut donc, autant que possible, se rapprocher des quartiers à desservir, à moins que des considérations relatives à la salubrité ne forcent à s'éloigner pour avoir une eau dont la qualité ne soit pas altérée par les immondices qui coulent dans les égouts.

Le volume d'eau peut être calculé à raison de 60 litres par individu.

La durée de l'écoulement dépend du mode de distribution. 1° On peut supposer que les eaux coulent pendant 24 heures d'un mouvement continu dans tous les tuyaux; 2° on peut laisser seulement les répartiteurs toujours ouverts, et régler l'écoulement des tuyaux de service, de manière que chaque concession soit servie en une heure de temps par exemple; 3° on peut diviser le sol en un certain nombre d'arrondissements, et laisser couler alternativement tous les répartiteurs et tuyaux de service dans chaque arrondissement.

Le premier mode serait le plus économique, et il devrait être adopté si l'on pouvait, sans inconvénient, employer des tuyaux de service d'un diamètre assez petit pour ne débiter en 24 heures que le volume d'eau nécessaire à la consommation.

Le second entraîne dans de plus grandes dépenses, puisqu'il exige un plus grand diamètre dans les tuyaux de service, mais il rend aussi la distribution plus sûre et plus facile.

Le troisième serait encore plus coûteux que le précédent, parce que l'augmentation dans les diamètres s'étend aussi aux répartiteurs; et, comme il ne présenterait pas d'ailleurs de nouveaux avantages, nous pensons que c'est le deuxième qui doit être préféré.

Assemblage des tuyaux en fonte. — On réunit les tuyaux par des joints à brides, ou par des joints à emboîtement. Dans le premier cas (*fig.* 41 et 40, *Pl. XIV*) chaque tuyau porte à ses extrémités une bride en retour d'équerre, qui saille sur le corps du tuyau et est percée de plusieurs trous. On pose les tuyaux bout à bout, et on les place de manière que les trous des brides des deux tuyaux contigus se raccordent les uns aux autres. On garnit l'intervalle entre les deux brides d'une rondelle en plomb, à laquelle une rondelle en cuir est attachée de chaque côté. Enfin, on serre le joint au moyen de boulons qui entrent dans les trous dont les brides des tuyaux sont percés.

Dans le second cas (*fig.* 42 et 43, *Pl. XV*), les tuyaux sont unis

par un emboîtement de cylindre. Pour cela on termine un bout de chaque tuyau par un renflement dans lequel emboîte le petit bout du tuyau suivant. L'intervalle qui les sépare, ou le vide compris entre la surface extérieure du tuyau mâle et la surface intérieure du tuyau femelle, est rempli de filasse ou de corde goudronnée sur la moitié de la longueur du joint *gg*. On lute ensuite avec de la terre glaise le tour de l'ouverture laissée entre les deux bouts; on pratique un trou dans la partie supérieure du lut, puis on y fait couler du plomb fondu qui remplit tout l'espace *hh* resté vide; on enlève la terre et l'on comprime fortement à coups de marteau l'anneau de plomb coulé.

La profondeur *ee* de l'emboîtement varie entre 16 et 9 centimètres, depuis les plus grandes dimensions jusqu'aux plus petites.

Un bon assemblage est ce qu'il y a de plus essentiel dans l'établissement d'une conduite, parce que c'est surtout dans les joints que se manifestent les fuites et toutes les causes de dégradation.

L'objection que l'on peut faire contre les tuyaux à emboîtement, est fondée sur l'embarras de changer une pièce cassée; mais on peut le prévenir en plaçant de distance en distance des manchons en fonte que l'on fait glisser à droite et à gauche lorsqu'on veut relever ou simplement faire des réparations à la portion de conduite comprise entre deux manchons. Il suffit de les espacer de 100 mètres sur les grosses conduites et de 50 mètres sur les petites.

On peut employer le même moyen pour réparer un tuyau cassé, sans démonter la conduite. Il suffit pour cela de poser un manchon en plomb laminé contre la fonte sur place. On serre ensuite fortement le plomb contre la fonte avec deux cercles en fer à vis, et l'on rive les extrémités. Le manchon pourrait également être en fonte en le composant de deux pièces assemblées avec des vis et des écrous.

On pose les conduites sous des galeries voûtées, dans les égouts ou en pleine terre sous les pavés des rues; mais, dans ce cas, il ne faut pas combler la tranchée avant de s'être assuré de l'état des joints. Pour cela, on bouche l'orifice de sortie, puis on laisse arriver l'eau pour faire supporter aux joints la pression due à la hauteur du réservoir supérieur, et l'on examine si les joints perdent.

DES ROBINETS.

L'objet des robinets est de se rendre maître du cours de l'eau; d'évacuer, au besoin, une conduite sur tout ou partie de sa longueur, afin de procéder aux réparations des dégradations ou de pourvoir momentanément à des services extraordinaires.

On comprend, d'après cela, qu'on ne saurait trop multiplier les robinets.

On en distingue de deux sortes: les *robinets d'arrêt* et les *robinets de décharge*.

On ne peut pas mettre moins de deux robinets d'arrêt sur une conduite: le premier immédiatement au-dessous de la prise d'eau, qui établit ou intercepte la communication entre le réservoir et la conduite; le second au-dessus du château d'eau ou de la fontaine à laquelle la conduite devra se terminer.

Comme aussi on ne peut pas mettre moins d'un robinet de décharge

dans la partie la plus basse de la conduite, pour ouvrir ou fermer une communication de l'intérieur à l'extérieur, et procurer, au besoin, l'évacuation des eaux qui y seraient contenues. On profite, pour donner un écoulement aux eaux, des égouts que l'on rencontre, et, à défaut, on construit des puisards où l'eau se rassemble et s'infiltre dans les terres.

Les conditions auxquelles il faut satisfaire dans l'établissement des robinets sont :

1°. Que l'œil soit précisément de même diamètre que l'intérieur de la conduite, afin que la vitesse de l'eau, en le traversant, n'éprouve aucune altération ;

2°. Que la fermeture s'opère lentement, afin que l'eau qui est renfermée dans la conduite ne puisse pas réagir sur les tuyaux et en opérer la rupture ;

3°. Qu'ils ferment hermétiquement, pour ne laisser aucune issue à l'eau.

On a employé d'abord les robinets coniques, dont la manœuvre s'opère à l'aide d'un levier. Chacun de ces robinets est composé d'une clef et d'un boisseau, dans lequel elle est reçue. La clef présente la forme d'un cône tronqué, surmonté sur les deux plans qui le terminent par un axe carré. L'axe supérieur est percé d'un trou destiné à recevoir le bout du levier, au moyen duquel s'opère le mouvement ; l'axe inférieur est également percé d'un trou destiné à recevoir une clavette qui tend à rendre plus intense le contact de la clef et du boisseau et à s'opposer à toute fuite. Le cône tronqué est pénétré, perpendiculairement à son axe, par un cylindre dont le diamètre est égal à celui de la conduite, et est évidement ferme l'œil de la clef.

Le boisseau offre en creux le cône tronqué que la clef présente en relief. Il est érigé perpendiculairement sur un bout du tuyau, avec lequel il fait corps, de même diamètre que la conduite, et qui porte à chacune de ses extrémités des brides en saillie, au moyen desquelles il est fixé à cette conduite. Une platine circulaire se place au-dessous du boisseau, et c'est en réagissant sur elle que la clavette opère le contact des surfaces.

On ne se sert de ces robinets que sur les petites conduites; mais lorsque les diamètres sont de plus de 15 à 16 centimètres, le mouvement est difficile et les fuites fréquentes.

M. Egault leur en a substitué un autre auquel il donne le nom de *robinet-coin*. Dans ce robinet, la clef, au lieu de tourner dans le boisseau, s'élève et descend au moyen d'une vis qui la pénètre en glissant dans deux coulisses. La même force sert à la manœuvre proprement dite du robinet et à opérer le contact immédiat des surfaces, c'est-à-dire qu'elle remplace les leviers ou les roues d'engrenage d'une part, et de l'autre les clavettes et vis de pression. Mais le point d'appui de cette force, la réaction qu'elle produit, se manifestent sur le coffre en fonte du boisseau, et l'on a reconnu la nécessité, pour empêcher les brides de casser, de relier les parties inférieures et supérieures par de forts boulons. Ce n'est qu'au moyen d'un grand effort qu'on parvient à fermer hermétiquement ce robinet.

Un autre inconvénient, c'est qu'on ne peut sceller le boisseau dans

le coffre en fonte qu'au moyen de plomb coulé, de manière que l'eau s'introduit facilement dans la partie supérieure du coffre et passe même d'un côté à l'autre du tuyau.

Au reste, comme on peut évider la clef, le poids de la matière et, par conséquent, le prix diminuent beaucoup, de sorte que c'est, après toutes considérations, celui qui mérite la préférence, surtout lorsque le diamètre est considérable.

Enfin les Anglais emploient les *robinets à vanne*, dans lesquels on a supprimé le boisseau. La clef remplit la fonction d'une vanne et intercepte l'écoulement en s'appliquant contre le tuyau (*fig.* 48, 49 et 50, *Pl. XV*). Ce robinet est encore plus économique que le précédent. Il avait d'abord paru en France d'un mauvais service, mais M. Mallet en a fait exécuter qui ont parfaitement réussi, et ce sont ceux de cette espèce qu'on emploie maintenant.

L'eau agissant elle-même contre la vanne opère, par la pression qu'elle exerce, le contact des surfaces et rend le robinet parfaitement étanche. Pour rendre ce contact plus intime, l'écrou, qui par son mouvement ascensionnel force la vanne à s'élever, ne fait pas corps avec cette vanne, et lui permet un mouvement horizontal dont le jeu, quoique très-petit, est néanmoins suffisant pour empêcher toute déformation.

DES VENTOUSES.

En général, la présence de l'air dans une conduite gêne le mouvement de l'eau et diminue le produit de l'écoulement; il est donc important d'avoir un moyen de le faire sortir. On se sert à Paris ou d'un robinet qu'on laisse ouvert pendant qu'on met l'eau dans la conduite, jusqu'à ce que l'air se soit échappé et que l'eau commence à jaillir, ou d'une soupape (*fig.* 51, 52, 53 et 54, *Pl. XV*) tellement disposée, qu'elle puisse laisser l'air s'échapper librement et se fermer d'elle-même lorsque l'eau vient prendre sa place et remplir la capacité du tuyau.

Voici la description que M. Girard a donnée de cette dernière espèce de ventouse, dont l'idée est due à M. le chevalier de Bettancourt.

Elle est composée d'un vase cylindrique en fonte de cuivre, de 20 centimètres de diamètre extérieur et de 35 centimètres de hauteur, communiquant avec le tuyau de conduite par un cylindre vertical de 10 centimètres de diamètre, boulonné sur une tubulure.

Ce vase porte intérieurement deux traverses, percées chacune d'un trou dans lequel coule librement une tige de métal formant l'axe matériel d'un globe creux de laiton destiné à servir de flotteur. Cet axe du flotteur est terminé à son extrémité supérieure par une portion de cône, laquelle sert d'obturateur à un orifice de même forme, pratiqué dans le fond horizontal du vase cylindrique ou boîte de la ventouse, lorsque le flotteur y est soutenu par l'action de l'eau dont elle est remplie.

Lorsque l'air de la conduite a pénétré dans la boîte de la ventouse et y a acquis assez de densité pour faire descendre convenablement le niveau de l'eau, le flotteur s'abaisse avec le fluide, entraîne l'obtura-

teur, que porte son axe, et laisse ouvert l'orifice de la ventouse par lequel l'air qu'elle contient s'échappe graduellement.

L'eau pesant sous le même volume à $+4^\circ$ et à $0^m,76$, 770 fois plus que l'air, il s'ensuit que, quelle que soit la densité de l'air dans la ventouse, elle ne peut jamais être telle, que le poids du volume déplacé par le globe soit égal à celui d'un même volume du liquide; par conséquent, si le niveau de l'eau baisse et qu'une partie du globe surnage, le poids du flotteur augmente, ce qui détermine son abaissement et l'ouverture de la soupape supérieure. Il n'y a que l'action de l'air comprimé contre la partie inférieure de l'obturateur, qui s'oppose à ce mouvement, mais elle est trop faible pour pouvoir détruire l'effet dû à l'abaissement du niveau de l'eau.

Ce moyen de se débarrasser de l'air a l'avantage de n'exiger aucune surveillance.

DÉGORGEMENT.

Les eaux d'une conduite peuvent être versées dans un réservoir pour y rester en réserve ou servir à de nouvelles distributions.

Elles peuvent alimenter des fontaines monumentales pour l'embellissement des places et des promenades; ou des bornes-fontaines pour le lavage des rues et des égouts.

Enfin elles peuvent être recueillies dans l'intérieur d'une maison pour servir à l'usage de ses habitants.

Les grands réservoirs doivent se faire en maçonnerie à bain de mortier, avec tant de soin, qu'il en résulte des pièces imperméables à l'eau, comme le marbre ou la terre cuite.

Dans les fontaines publiques, nous distinguerons l'ouvrage d'architecture et le système hydraulique : l'architecture peut varier à l'infini la forme et la décoration de ces monuments.

Le système hydraulique a pour objet de distribuer l'eau suivant la forme de la fontaine, et de la faire jeter par des statues, par des conques marines, des urnes, des ajutages, etc., de la faire sortir de l'ouverture d'un mur ou d'une masse de rochers. Les moyens qu'on emploie sont toujours semblables, et se réduisent à boucher des tuyaux de plomb sur une conduite principale, et à les faire aboutir par des inflexions aux divers orifices par où les eaux doivent être versées.

Lorsqu'on veut former un jet d'eau, il faut que l'on ait à la sortie de l'orifice une vitesse due à la hauteur à laquelle elle doit s'élever en vertu de la charge motrice. Il faut donc réduire l'orifice à une grandeur telle, qu'en multipliant cette vitesse par la superficie de l'ouverture on ait une dépense égale à celle de la conduite.

Lorsque l'eau doit se répandre en nappe, alors la colonne montante peut conserver la même grosseur que la conduite alimentaire, et s'élever jusqu'à la hauteur à laquelle l'eau peut naturellement monter en conservant la vitesse ordinaire.

Le lavage des rues se fait à Paris au moyen de bouches d'eau placées au-dessus du sol des rues. On détermine la position de ces bouches d'eau d'après la condition que chacune d'elles puisse arroser la plus grande superficie possible du terrain. Or, pour atteindre ce but,

il est évident qu'elles doivent être érigées sur les points les plus élevés de chaque rue, c'est-à-dire à la limite commune de deux bassins d'égouts contigus. En effet, la surface du pavé de Paris se trouve divisée en plusieurs îlots, sur le contour desquels les eaux pluviales et domestiques s'écoulent en différents sens, pour se rendre dans l'égout le plus voisin.

Les robinets des bouches d'eau sont enfermés dans des bornes creuses en fonte, de forme prismatique. L'orifice de la bouche d'eau porte un pas de vis, destiné à recevoir, en cas d'accident, un tuyau de cuir qui alimente une ou plusieurs pompes d'incendie.

Les bornes ont 1 mètre de hauteur; leur base rectangulaire a ses deux côtés inégaux, l'un de 38 centimètres, l'autre de 19 centimètres : on les adosse contre les murs de face des maisons sur lesquelles elles forment saillie.

Les petits tuyaux de distribution dans les maisons particulières n'ont qu'un diamètre de 1 à 2 pouces. Il est important de s'assurer, avant de les mettre en place, qu'ils n'ont aucune fente : on les essaye en les emplissant sous une charge convenable, en observant si aucune partie ne se mouille à l'extérieur. On fera bien, en général, de renfermer le tuyau conducteur dans une rainure qui n'ait aucune communication avec une cavité trop considérable, de peur qu'une fuite ayant lieu, l'eau ne se répande en abondance et ne produise de grands dégâts dans l'intérieur des maisons (1).

---

(1) Le cadre dans lequel nous avons dû nous renfermer nous a obligé à ne donner que des notions générales sur la conduite et la distribution des eaux. Les personnes qui voudraient en faire une étude plus approfondie ne peuvent pas consulter un ouvrage meilleur que celui que vient de publier M. Dupuit, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Directeur du service municipal de la ville de Paris, sous le titre suivant :

Traité théorique et pratique de la conduite et de la distribution des eaux, suivi d'un Extrait de l'essai sur les moyens de conduire, d'élever et de distribuer les eaux, par GENIEYS, ancien Ingénieur en chef du service municipal de Paris, *et de la Description des filtres naturels de Toulouse*, par D'AUBUISSON, ancien Ingénieur en chef des Mines. In-4° de 69 feuilles, plus un atlas in-folio oblong de 48 planches. (Chez MALLET-BACHELIER, libraire, quai des Augustins, 55. — Prix : 50 fr.)

FIN DU SECOND VOLUME.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE SECOND VOLUME.

PHYSIQUE.

Pages.

Définitions. — Propriétés générales des corps 1
Lois de la chute des corps 6
Du centre de gravité. — De l'équilibre des solides. — Du poids, de la masse et de la densité des corps. — De la balance 10
Du pendule 15
De la balance 18
Hydrostatique 19
Pression des liquides 22
Des gaz. — De l'équilibre des gaz et des pressions atmosphériques 29
Du baromètre 31
Loi de Mariotte 35
Pompe aspirante 36
Pompe foulante 37
Pompe aspirante et foulante 38
Machine pneumatique 39
Machine pneumatique à deux corps de pompe 40
Machine de compression 41
Du siphon 42
Presse hydraulique 42
Du mouvement des gaz 43
Poids spécifique des gaz 44
Fluides incoercibles et impondérables 46
Dilatation et contraction des corps par les changements de température 48
Thermomètres 51
Sources de chaleur 52
Calorique rayonnant. — Calorique spécifique 53
De la conducibilité 57
Changements d'état des corps 58
De l'hygrométrie 63
Des vents 65
Brouillards et nuages 66
Udomètre 66
Électricité 67
Machine électrique 67
Tabouret électrique 71
Électromètre, électroscope 72
Développement de l'électricité par influence 73
Distribution de l'électricité à la surface des corps. — Des pointes 75

Pages.
Électricité accumulée 76
Bouteille de Leyde 76
Batterie électrique 77
Électrophores 78
Condensateur 78
Pouvoir des pointes 79
Paratonnerre 79
Choc en retour 80
Développement de l'électricité par le simple contact 81
Pile voltaïque 81
Magnétisme 83
De l'électro-magnétisme 85
Télégraphie électrique 87
Acoustique 87
Optique 91
De la catoptrique ou de la réflexion de la lumière 92
Dioptrique ou réfraction de la lumière 96
Des prismes 96
Des lentilles 97
De la dispersion des couleurs 98
De l'achromatisme 98
Besicles 99
Loupes ou microscopes simples 99
Chambre claire 100
Chambre noire 100
Lunette de Galilée 101
Lunette astronomique 101
Lunette terrestre 101
Des phares 102

CHIMIE.

Notions sur la nature des corps et sur la force qui unit leurs parties constituantes 111
Nomenclature chimique 114
Métalloïdes 117
Combinaisons de l'oxygène et de l'hydrogène avec les autres métalloïdes et de ces métalloïdes entre eux 128
Combinaisons des métalloïdes entre eux 129
Combinaisons de l'hydrogène 129
Combinaisons de l'hydrogène avec le carbone 130
Combinaisons du phosphore et de l'hydrogène 131
Des combinaisons du carbone 133
Combinaison du soufre et du carbone 133
Combinaison du chlore et du carbone 133
Combinaison de l'azote et du carbone 133
Des combinaisons du phosphore 134
Combinaison du soufre et du phosphore 134
Combinaison de l'iode et du phosphore 134

Pages.
Combinaison du chlore et du phosphore 134
Des combinaisons du soufre 135
Combinaison de l'iode et du soufre 135
Combinaisons du chlore et du soufre 135
Des combinaisons de l'iode 135
Combinaison du chlore et de l'iode 135
Combinaison de l'iode et de l'azote 135
Combinaisons du brome 136
Combinaisons du chlore 136
Combinaison du chlore et de l'azote 136
Combinaisons de l'azote 136
Des combinaisons de l'oxygène avec les métalloïdes. — Oxydes et acides métalloïdiques 136
Combinaisons de l'oxygène avec l'hydrogène 136
Combinaisons du carbone et de l'hydrogène 137
Combinaisons du phosphore et de l'oxygène 138
Combinaisons du soufre avec l'oxygène 139
Combinaisons de l'iode et de l'oxygène 140
Combinaisons du chlore avec l'oxygène 140
Combinaisons de l'azote et de l'oxygène 141
Des hydracides 142
Des métaux 142
Propriétés physiques des métaux 143
Propriétés chimiques des métaux 144
Métaux de la première section 146
Métaux de la deuxième section ou métaux alcalins 146
Métaux de la troisième section 146
Métaux de la quatrième section 148
Métaux de la cinquième section 153
Metaux de la sixième section 153
Des alliages 155
Des oxydes métalliques 159
Des sels 161
Lois de Berthollet 165
Des carbonates 166
Des phosphates 167
Des sulfates 168
Des azotates 170
Des chlorates 171
Des chlorures 173
Des chlorhydrates 175
Des silicates 175
Des verres 176
Émaux 177
Des chaux, des mortiers et des bétons 177
Des sulfures 182
Chimie organique 184
Matières constituantes des végétaux 186
Fermentation alcoolique 190
Corps gras 191

NOTIONS DE GÉOLOGIE.

Pages.
Objet de la géologie ... 195
Composition de l'écorce solide de la terre ... 195
Terrains massifs de cristallisation ou de formation ignée, et terrains stratifiés ou de formation aqueuse ... 196
Terrains massifs de cristallisation ... 197
Des granites et des porphyres ... 198
Des granites et des porphyres comme matériaux de construction ... 203
Terrains sédimentaires stratifiés ou de formation aqueuse ... 204
Phénomènes géologiques de l'époque actuelle ... 205
Composition de la croûte terrestre ... 209
Terrains primaires ou de transition ... 210
Terrains paléozoïques. — Leur division en cinq systèmes. — Étude du système cambrien. — Étude du système silurien ... 210
Division des terrains de transition ... 212
Système silurien ... 213
Système silurien de la Bohême ... 214
Terrain silurien de la Scandinavie et de la Russie ... 215
Système silurien de la Bretagne ... 216
Terrain silurien de la Montagne-Noire ... 217
Du système cambrien ... 219
Système dévonien. — Système dévonien en Angleterre ... 220
Terrain dévonien de la Bretagne ... 221
Terrain dévonien de l'Ardenne ... 222
Terrain dévonien de la Russie ... 223
Du système carbonifère ... 223
Calcaire carbonifère de la Belgique ... 224
Calcaire carbonifère de la France ... 224
Calcaire carbonifère de la Russie ... 225
Terrain houiller ... 225
Répartition du terrain houiller sur la surface de la France ... 226
Répartition du terrain houiller en Angleterre ... 226
Comparaison entre les terrains houillers de la France et des autres pays ... 227
Relief du terrain houiller en France ... 227
Classification des terrains houillers ... 228
Composition des terrains houillers ... 228
Description du terrain houiller de la Haute-Loire ... 230
Composition du terrain houiller de la Haute-Loire ... 231
Division du terrain houiller de la Loire ... 231
Système de Rive-de-Gier ... 232
Système inférieur de Saint-Étienne ... 233
Système moyen de Saint-Étienne ... 233
Système supérieur de Saint-Étienne ... 234
Origine de la houille ... 235
Formation de la houille ... 235
Des combustibles minéraux ... 236
Asphalte ... 237
Charbon de terre ... 237
Graphite ... 238
Anthracite ... 238

Pages.
Houilles.......... 238
Lignites.......... 239
Tourbes.......... 239
Système permien.......... 240
Système permien de la Thuringe.......... 240
Système permien de l'Angleterre.......... 241
Système permien de la Russie.......... 241
Système permien dans les Vosges.......... 241
Matériaux de construction que présentent les terrains paléozoïques.......... 242
Du trias.......... 243
Trias de la Lorraine.......... 243
Trias de l'Allemagne et de l'Angleterre.......... 247
Terrain jurassique.......... 248
Terrain jurassique en Angleterre.......... 249
Terrain jurassique en France.......... 250
Matériaux de construction fournis par les terrains jurassiques.......... 252
Formations crétacées.......... 253
Terrain crétacé de la France.......... 254
Terrain crétacé de l'Angleterre.......... 258
Matériaux de construction du terrain crétacé.......... 259
Terrains tertiaires.......... 259
Terrains tertiaires inférieurs du bassin de Paris.......... 260
Terrains tertiaires moyens.......... 262
Terrains tertiaires supérieurs.......... 264
Matériaux de construction des terrains tertiaires.......... 264
Terrain diluvien.......... 265
Terrains volcaniques.......... 268

MÉCANIQUE DES CORPS SOLIDES.

Définitions.......... 273
Équation finie du mouvement uniforme.......... 275
Mouvement uniformément varié.......... 276
Accélération.......... 276
Mouvement curviligne d'un point. — Direction de la vitesse.......... 276
Composition et décomposition des vitesses.......... 277
Composantes de la vitesse parallèlement aux axes.......... 277
Déviation.......... 277
Composantes de la déviation suivant les axes.......... 278
Direction de la déviation.......... 278
Accélération dans le mouvement déviatoire.......... 279
Composantes de la déviation suivant la tangente et la normale.......... 279
Mouvement de translation et de rotation.......... 280
Vitesse angulaire.......... 282
Réduction générale de tout mouvement.......... 284
Réduction générale à un mouvement hélicoïdal.......... 284
Mouvement continu parallèlement à un plan fixe.......... 285
Mouvement continu autour d'un point fixe.......... 286
Transformation des mouvements.......... 286
Des manivelles.......... 286

Pages.
Des engrenages........ 287
Du frottement........ 289
De la raideur des cordes........ 290
De l'équilibre du treuil et de la poulie, en ayant égard au frottement........ 291
Des moufles........ 293
De la chaîne........ 294
Du frottement des engrenages........ 294
Des cames........ 296
De l'équilibre de la vis........ 296
Travail d'une force, force vive........ 296
Unité de travail........ 297
Énoncé du principe des vitesses virtuelles........ 297
Travail de la résultante de forces quelconques........ 297
Force vive........ 298
Mouvement produit par une force constante........ 299
Proportionnalité de la vitesse à la force........ 300
Comparaison des forces qui agissent sur des masses quelconques........ 301
Travail des forces mouvantes et résistantes........ 302
De l'homme et du cheval........ 304
Tableau des quantités d'action que peuvent fournir moyennement l'homme et le cheval dans divers genres de travaux........ 305
Force vive d'un corps tournant autour d'un axe. — Moment d'inertie........ 306
Travail des forces appliquées à un corps solide en mouvement........ 307
Somme de travail de deux forces égales et directement opposées, appliquées à deux points différents en mouvement........ 307
Du travail de plusieurs forces appliquées aux divers points d'un système solide........ 308
Du travail dû à la pesanteur dans le mouvement d'un système matériel quelconque........ 309
Mouvement varié rectiligne produit par une force constante........ 310
Relation entre la masse d'un point matériel, la force qui le sollicite et l'accélération que cette force lui imprime........ 312
Relation entre la quantité de mouvement, la force et le temps........ 313
Relation entre le travail et la force vive........ 313
Application à la chute des corps pesants........ 314
Mouvement et décomposition des forces concourantes; parallélogramme et polygone des forces........ 315
Mouvement curviligne d'un point sous l'influence de forces quelconques... 316
Mouvement d'un point considéré indépendamment de la courbure de la ligne qu'il décrit. — Effet du travail des forces quelconques. — Effet de la force tangentielle........ 319
Trajectoire d'un point pesant dans le vide........ 319
Force centripète dans le mouvement circulaire........ 321
Oscillations du pendule simple........ 323
Du pendule conique........ 326
Principe de la réaction égale à l'action........ 326
Relation entre l'impulsion des forces et la quantité de mouvement d'un système matériel........ 327
Théorème général du mouvement du centre de gravité d'un système matériel........ 327
Relation entre le travail des forces et la force vive du système........ 328

Pages.
Théorème des vitesses virtuelles ou du travail virtuel 330
Théorème du travail virtuel 331
Cas particuliers des forces situées dans un même plan 333
Cas particuliers des forces parallèles dans l'espace 334
Emploi de la statique dans les questions de dynamique 335
Principe général de dynamique de d'Alembert 335
Propriétés des forces équivalentes dans le mouvement d'un corps solide 336
Du mouvement le plus général d'un corps solide 337
Théorie de la résistance des solides 337
De la résistance à un effort de traction 338
De la résistance à l'écrasement 339
De la résistance à la rupture 341
Solide encastré chargé d'un poids à son extrémité libre 342
Solide encastré et chargé d'un poids à son extrémité, et en outre de poids uniformément répartis 345
Pièce posée sur deux appuis et chargée en son milieu 346
Pièce posée sur deux appuis et chargée en un point quelconque 347
Pièce posée sur deux appuis et chargée uniformément sur sa longueur 347
Pièce posée sur deux appuis, chargée uniformément d'un poids p par mètre de longueur, et en outre d'un poids P placé en C, la longueur étant toujours égale à l 348
Pièce d'une longueur l posée sur deux appuis et chargée de poids P, P', P'', placés à des distances x, x', x'' du point A 349
Solides d'égale résistance à la rupture 350
Détermination des moments d'inertie de diverses substances planes, et applications à la résistance des solides prismatiques encastrés 351
De la résistance à une petite torsion 354
De l'équilibre des massifs formés de matières adhérentes 356
Équilibre des massifs de maçonnerie faits en pierres posées régulièrement à joints recouverts et par assises horizontales 361
Equilibre des massifs de maçonnerie dans le cas où le mur est soumis à un effort exercé latéralement contre une de ses faces 362
Cas où le mur peut s'écarter du plan de séparation, tourner sur son arête inférieure et être renversé 363
Des massifs ou des murs d'égale résistance 364
Des murs de revêtement qui soutiennent la poussée des terres ou des eaux 365
Des voûtes 370
De l'équilibre d'une courbe flexible 370
De l'équilibre de plusieurs corps solides juxtaposés 373
Des constructions en charpente 378
Des poutres armées ou autres combinaisons analogues 378
Principes généraux de la disposition des constructions en charpente 379
Des constructions soumises à des efforts verticaux et portées sur plusieurs points d'appui 380
Des constructions soumises à des efforts horizontaux et portées sur plusieurs points d'appui 381
Des constructions soumises à des charges verticales et portées sur deux points d'appui seulement 382
Des constructions soumises à des charges verticales portées sur deux points d'appui, et contenues entre deux plans fixes 387

HYDRAULIQUE.

Pages.

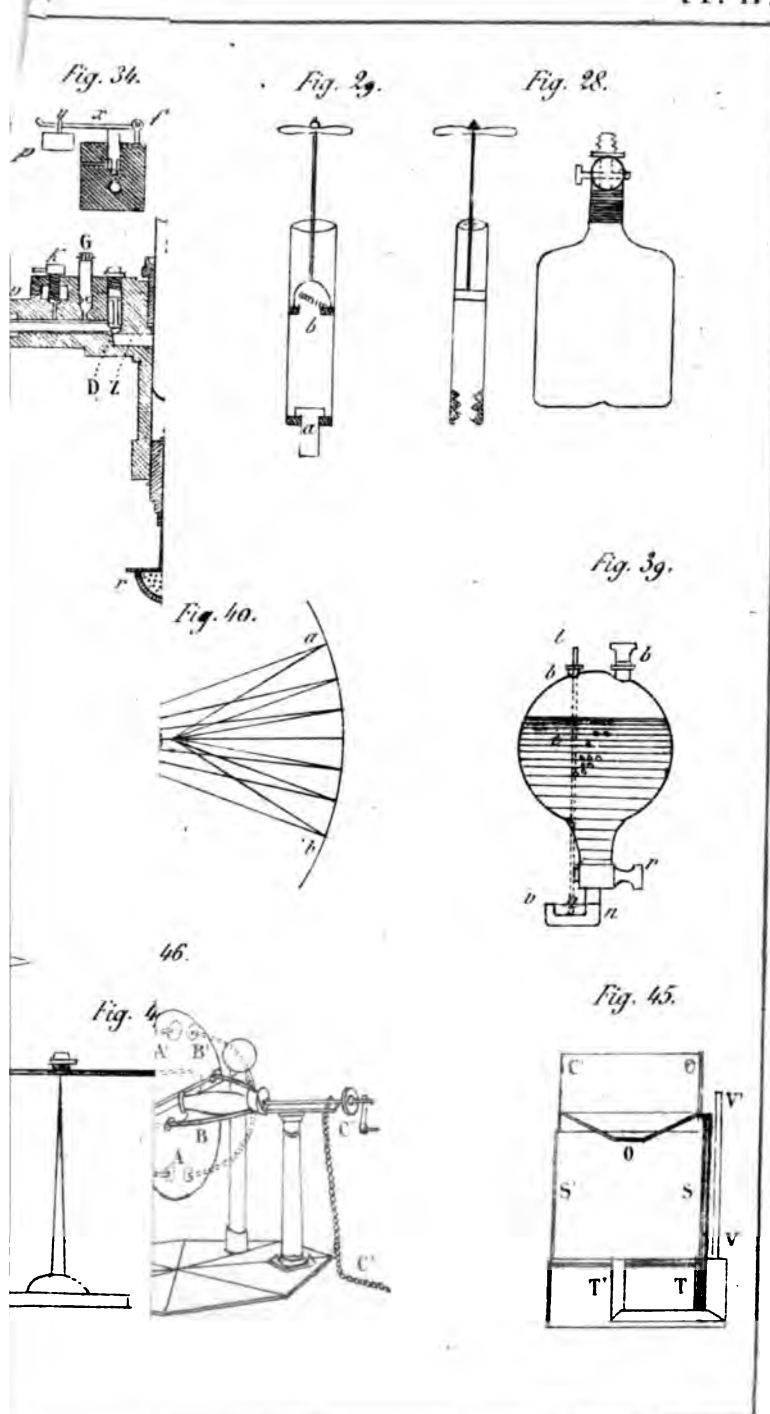
Théorie du mouvement des fluides incompressibles........ 391
Du mouvement permanent des fluides........ 391
De l'écoulement des liquides par des orifices........ 391
Hypothèse du parallélisme des tranches........ 391
Du trop-plein........ 392
Flotteur de M. de Prony........ 392
Vase de Mariotte........ 393
Théorème de Toricelli........ 393
Des fluides élastiques........ 396
Contraction de la veine fluide........ 397
Vérification expérimentale des lois de l'écoulement........ 399
Des moyens à employer pour tenir compte des effets de la contraction..... 400
Des ajutages et de leur influence sur l'écoulement........ 400
Des jets d'eau........ 402
Vannes des écluses........ 403
Orifices accompagnés d'un coursier........ 403
Orifices accompagnés de buses pyramidales........ 403
Orifices accompagnés d'un coursier à parois verticales qui se rapprochent. 404
Orifices accompagnés d'un ajutage cylindrique........ 404
Cas où la section du tuyau s'élargit au delà de l'orifice........ 406
Écoulement de l'eau par des déversoirs........ 406
Du mouvement de l'eau dans les tuyaux de conduite........ 407
Table des vitesses de l'eau qui s'écoule dans les tuyaux........ 410 et 411
De la pente à donner aux conduites d'eau........ 412
Observations sur l'influence de la vitesse sur la perte de chute........ 412
Relation entre le volume d'eau, la déclivité et le diamètre de la conduite.. 412
Des Tables destinées à faciliter les calculs d'établissement des conduites.. 414
Écoulement de l'eau dans une conduite d'un débit uniforme, sans aucun orifice sur sa longueur........ 414
Déterminer à quelle hauteur l'eau pourra s'élever au-dessus du sol à l'extrémité d'une conduite dont le produit et le diamètre sont donnés....... 415
Distribution d'eau par une conduite d'un diamètre uniforme, alimentant dans sa longueur divers écoulements d'un volume déterminé........ 416
Distribution d'eau par une conduite dont le diamètre varie........ 416
Condition relative à la pression qui doit exister près des orifices de prise d'eau........ 417
Écoulement par une conduite de $0^{m},25$ alimentant cinq orifices........ 417
Influence des changements brusques de direction des conduites........ 418
Proportions des coudes dans le service des eaux de Paris........ 419
Pression exercée par l'eau en un point quelconque de la conduite........ 419
Perte de force vive produite par les étranglements des conduites........ 420
Perte de force vive produite par l'élargissement des conduites........ 421
Conséquences relatives à la forme des conduites........ 421
Du mouvement de l'eau dans les aqueducs et dans les canaux........ 422
Des relations entre la vitesse à la surface, la vitesse de fond et la vitesse moyenne dans un courant où la pente et la section sont constantes... 423
Jaugeage des eaux courantes........ 423
Mode de jaugeage des anciens fontainiers........ 423

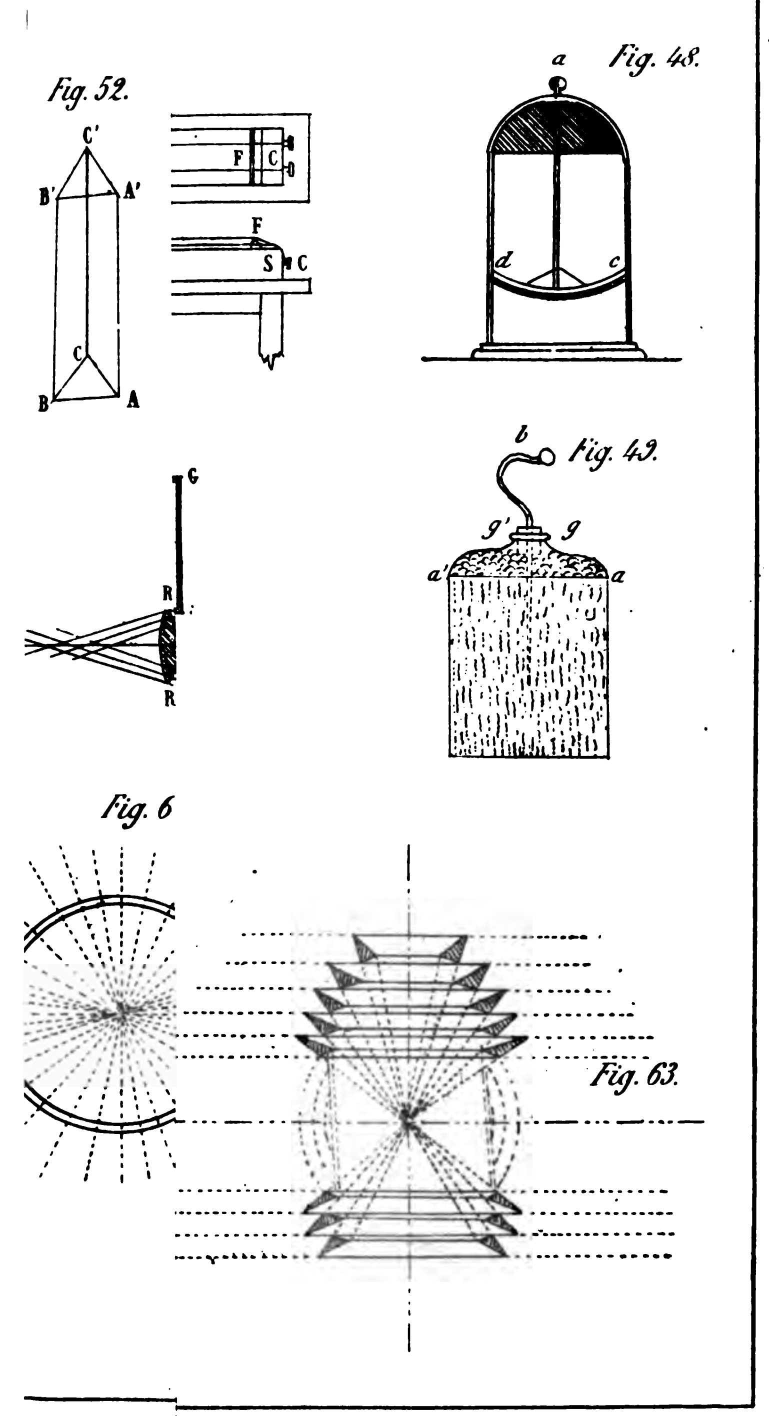
Pages.
Mode de jaugeage employé pour les petits cours d'eau 424
Résistance des parois d'un canal au mouvement de l'eau 424
Détermination de la vitesse moyenne. — Sa relation avec la vitesse à la surface 427
Divers procédés pour connaître le produit d'un courant d'eau 428
Vannes de prise d'eau et de garde 431
Moteurs hydrauliques 432
Récepteurs hydrauliques 433
Effet théorique des récepteurs hydrauliques 433
Conditions du maximum d'effet 434
Classification des principales variétés de roues hydrauliques 435
Théorie de la résistance des fluides 435
De la réaction produite par l'écoulement d'un fluide 435
Du choc d'une veine fluide contre un plan 436
De la résistance des fluides dans le cas d'un corps plongé dans un fluide indéfini 438
Des plans minces 440
Des corps prismatiques 441
Des corps prismatiques garnis de proues ou poupes 441
D'une sphère 441
D'un corps ayant la figure d'un vaisseau 442
Moyens employés pour fournir de l'eau à une ville 442
Distribution des eaux 443
Prise d'eau 443
Conduite 446
Des différents modes de distribution des eaux 447
Des robinets 449
Des ventouses 451
Dégorgement 452

PLANCHES I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII, XIV, XV.

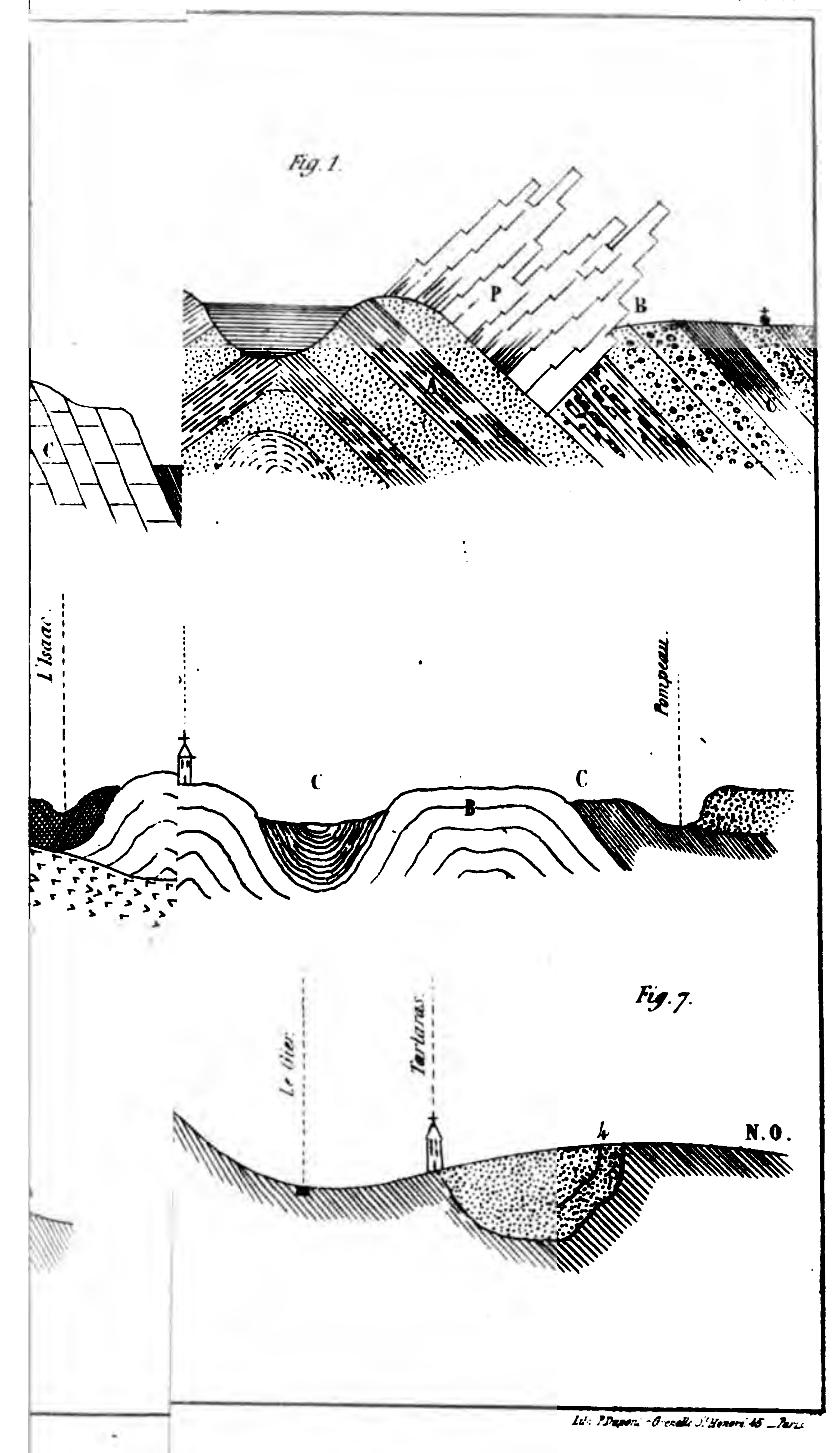
FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU SECOND VOLUME.

Fig. 2.
F
A'
C
L
K'
Fig. 8.
Fig. 11.
Fig. 3.
F
l
L
Fig. 18.
C
f
t
o
L
Fig. 21.
Fig
M
E
Fig. 20.
A
Fig. 19.
f
b
m
g
d
h
a
n
i
c

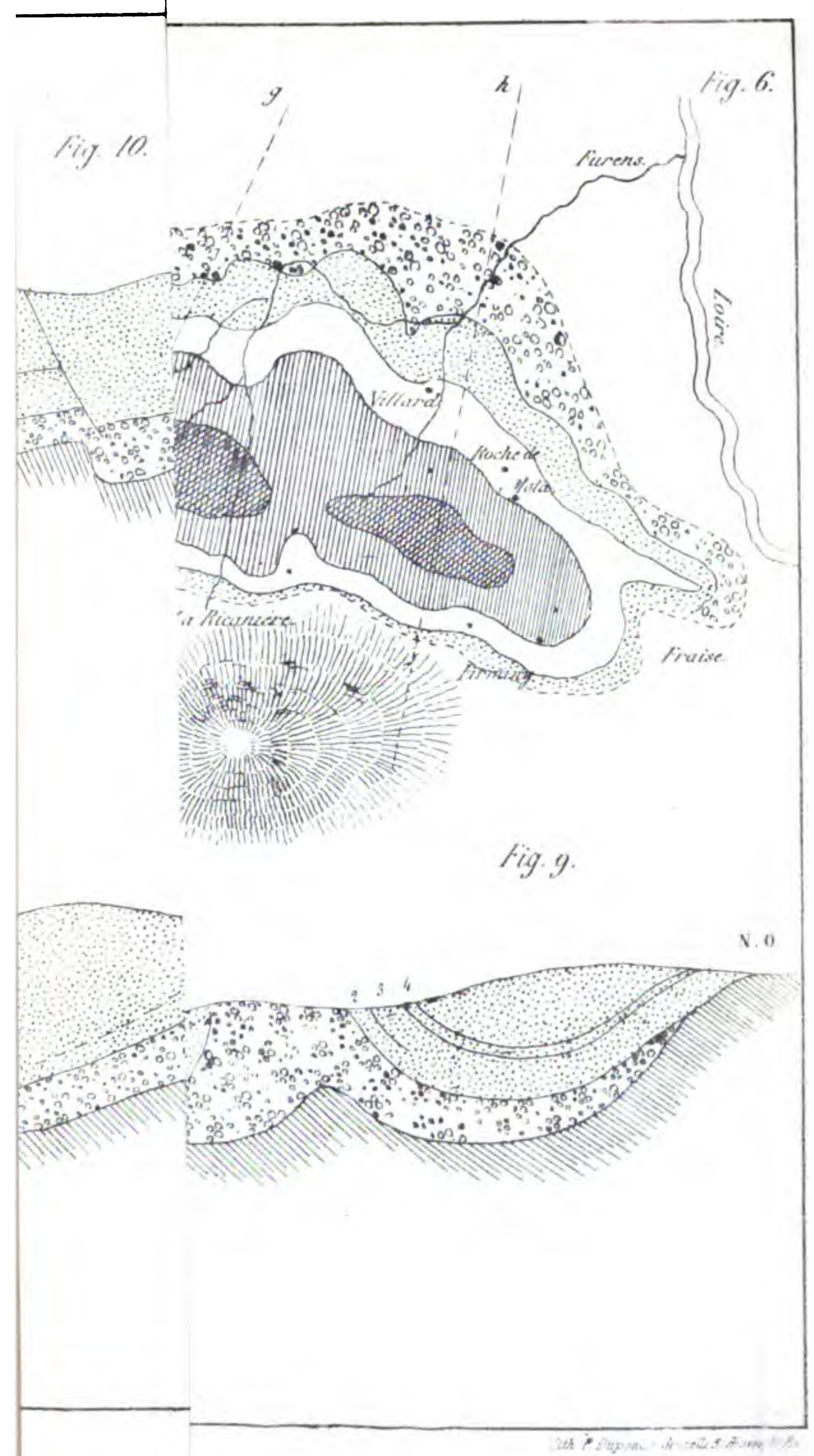

Fig. 34.
Fig. 29.
Fig. 28.
G
D Z
a
b
Fig. 39.
Fig. 40.
l
b
b
a
b
r
v
n
46.
Fig. 45.
Fig. 4
A'
B'
B
A
C'
C
C
S'
S
O
V'
V
T'
T



Lith. P. Dupont ... r. St Honoré 45 ... Paris.



Lith. P. Dupont - Grenelle S.t Honoré 45 _ Paris.


Fig. 10.
Fig. 6.
g
h
Furens.
Loire
Villard
Roche de
Fraise.
Fig. 9.
N. O
2
3
4

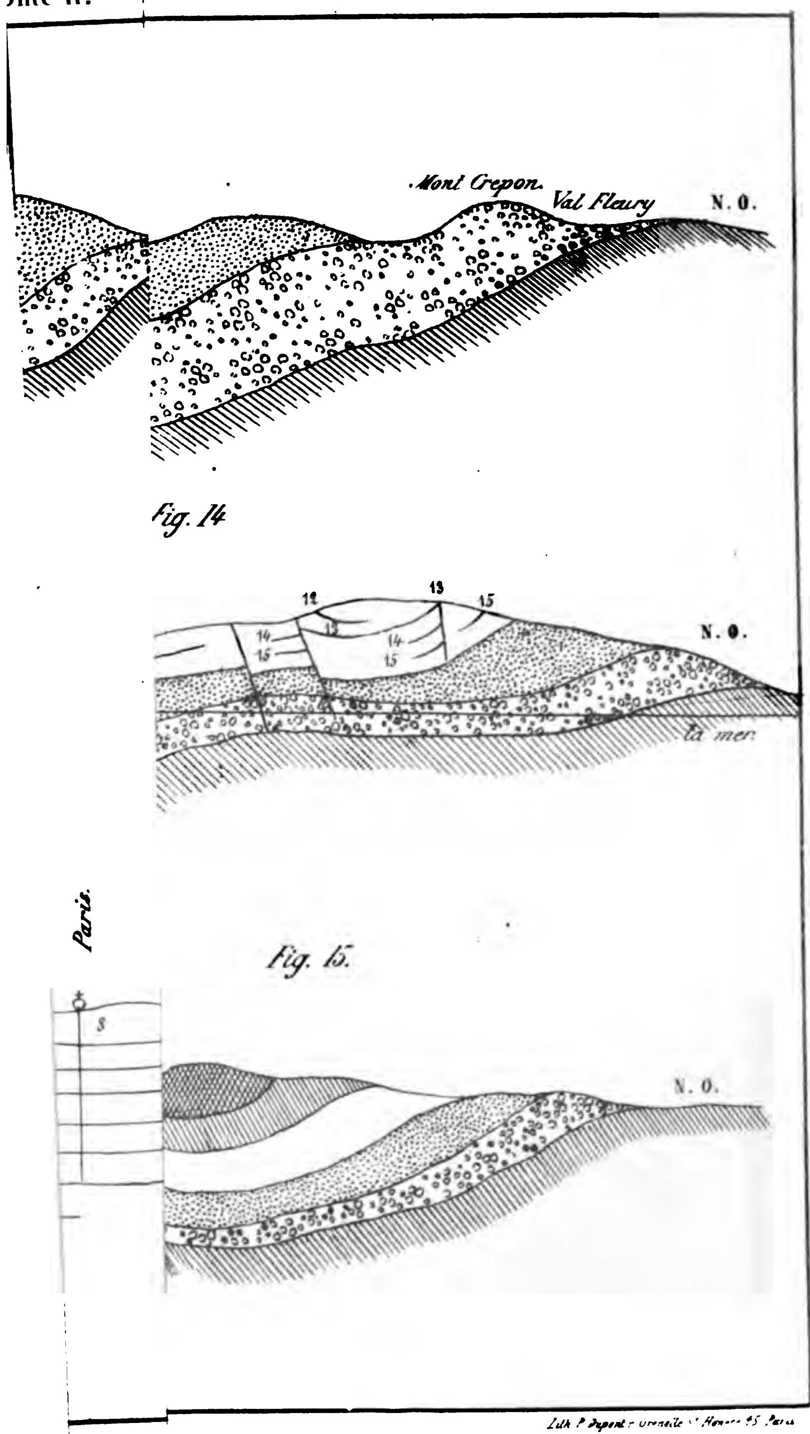
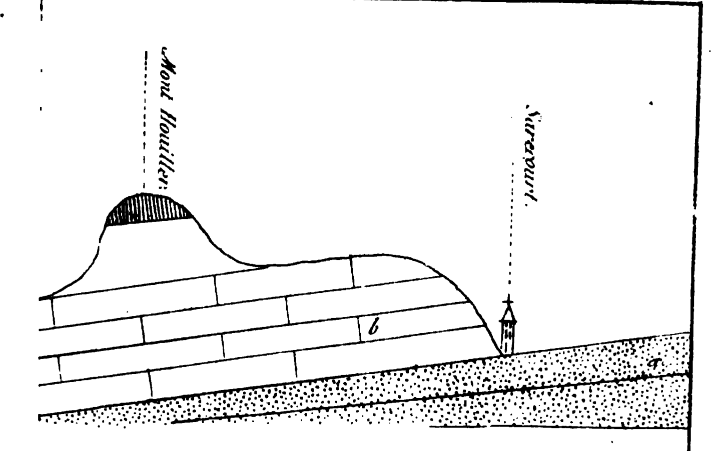


Fig. 14

Fig. 15.

Lith P. Dupont r. Grenelle St. Honoré 45 Paris



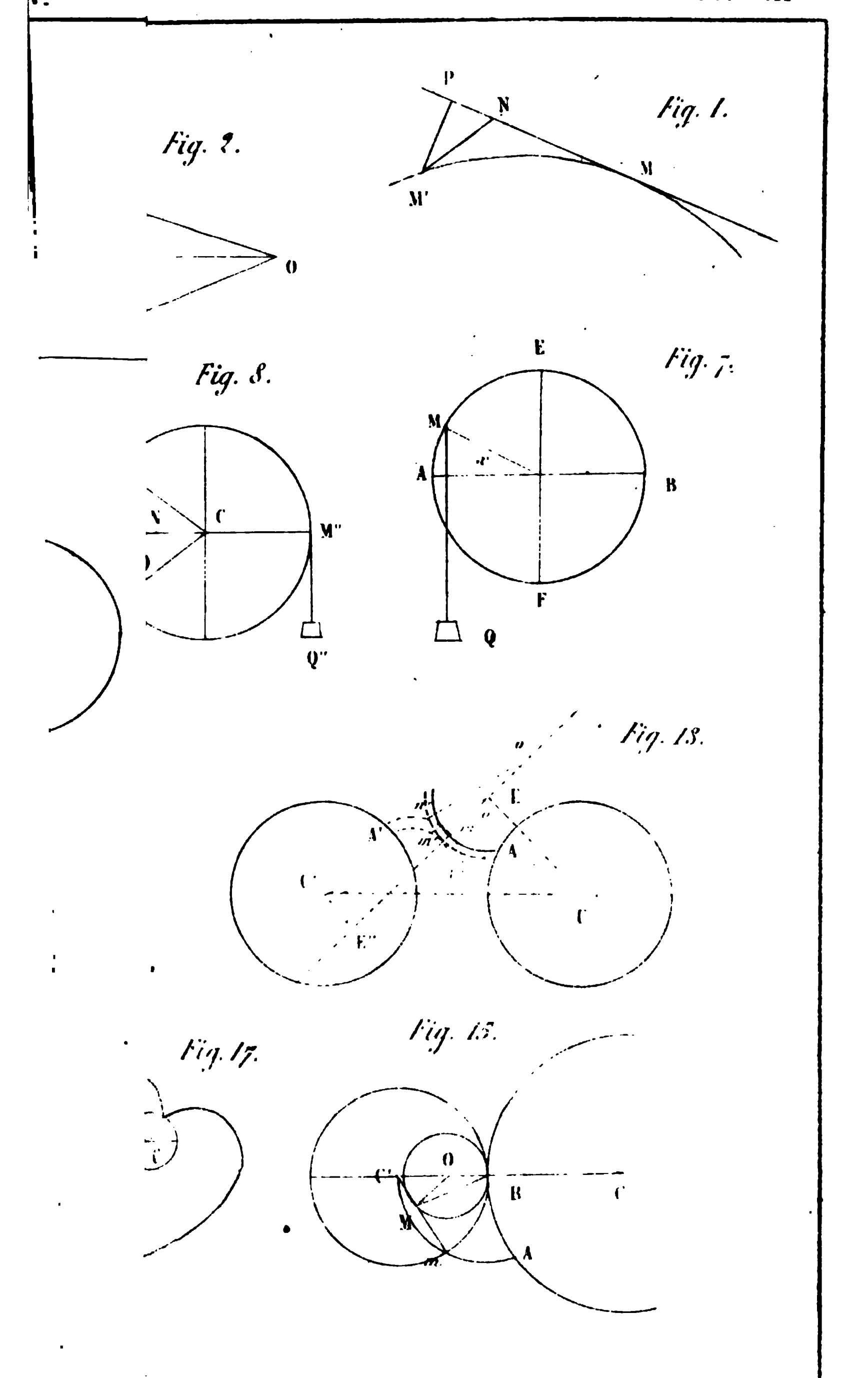
Plaine de la Lorraine.

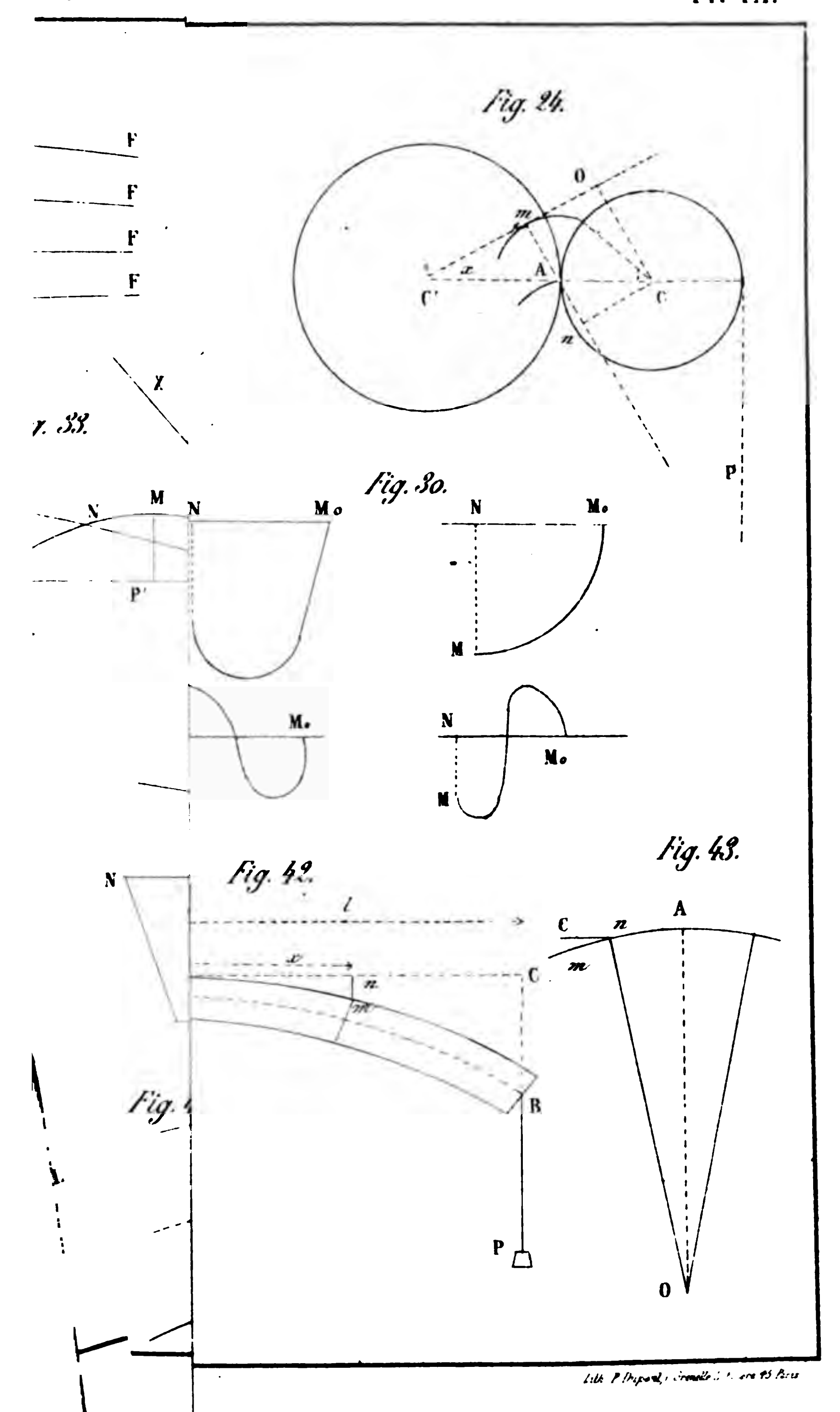
C C

B D

D

20.


Fig. 1.
P
N
M
M'
Fig. 2.
O
Fig. 8.
C
M''
Q''
Fig. 7.
E
M
A
B
F
Q
Fig. 18.
E
A'
A
C
E''
C
Fig. 15.
Fig. 17.
O
C'
B
C
M
m
A



Lith. P. Dupont, r. Grenelle St. Honoré 45 Paris

Fig. 45

$\frac{pd'}{l}$ $\frac{pd}{l}$

l

A d d' B

C

P

Fig. 50.

B p A

m

P

Fig. 57.

c

h

F O

a b

Fig. 63.

D T t C c E

d

B A

Pl. XI.

Fig. 70.

D C P E F T' T α b G B A

Fig. 77.

C B l L K K d a A D

Fig. 85.

n n' m' m

Lith. P. Dupont, r. Grenelle S.t Honoré, 45 _ Paris.

Fig. 95.

Fig. 94.

q N r α p B A

Fig. 102.

q α m 2p 2p q a

Fig. 101.

C q E r α b a

09.

B

Fig. 108.

t T ig. 3.

Fig. 2.

N N n n O M' M m m O

Fig. 1.

Pl. XIII.

Fig. 1

Fig. 8.

Fig. 7.

Fig. 23

Fig. 22.

Fig. 26.

. 29.

nverted.

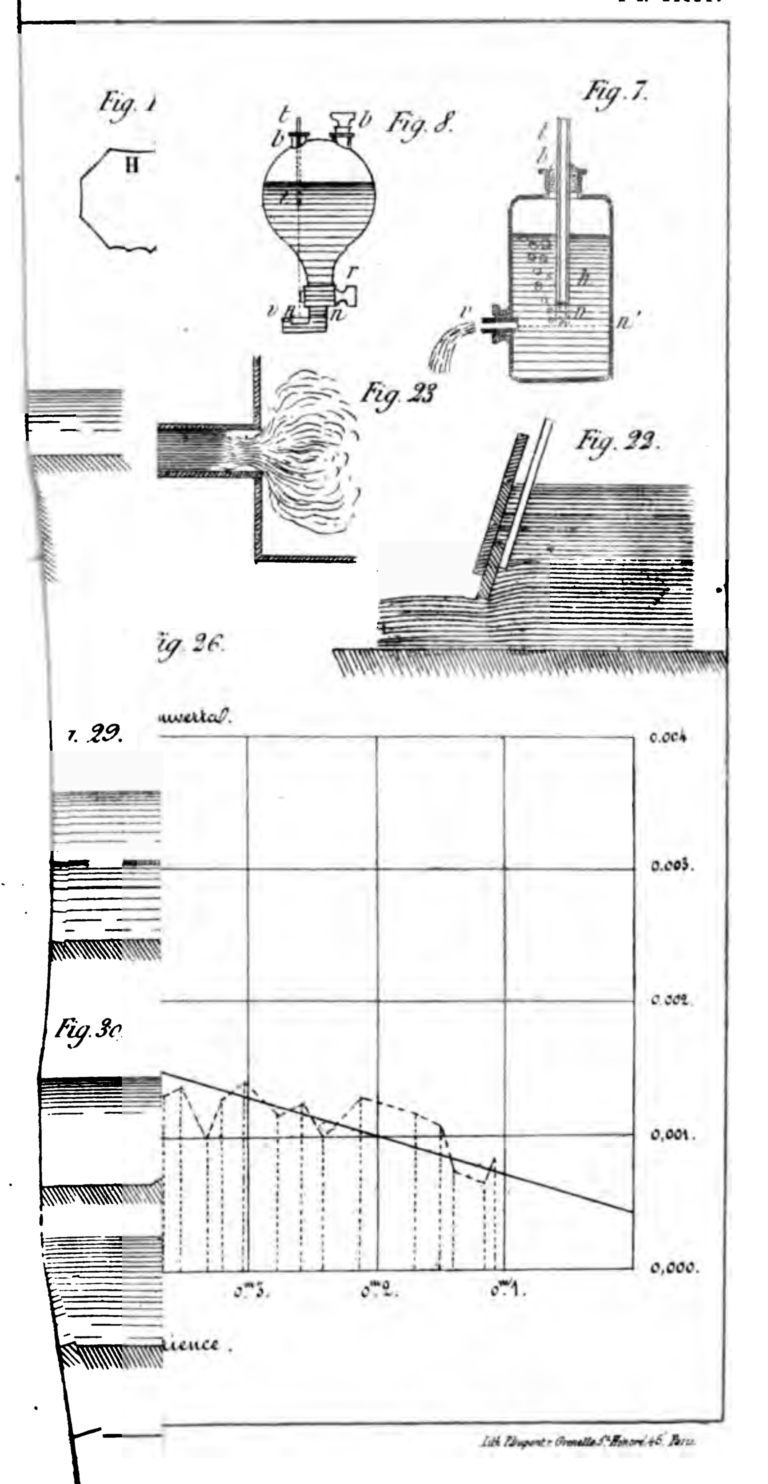
0.004

Fig. 30.

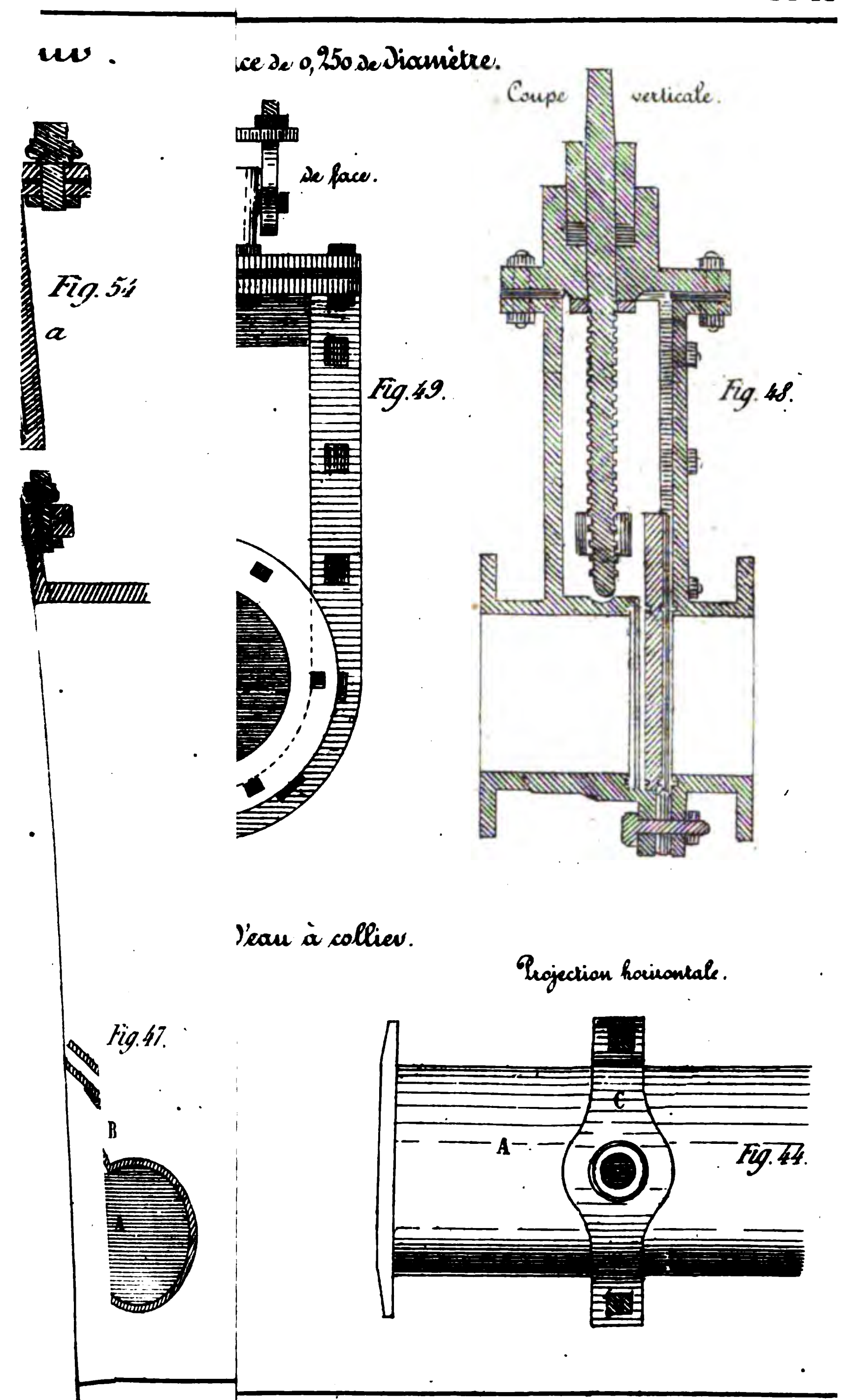
$0^m 3$.

rience.



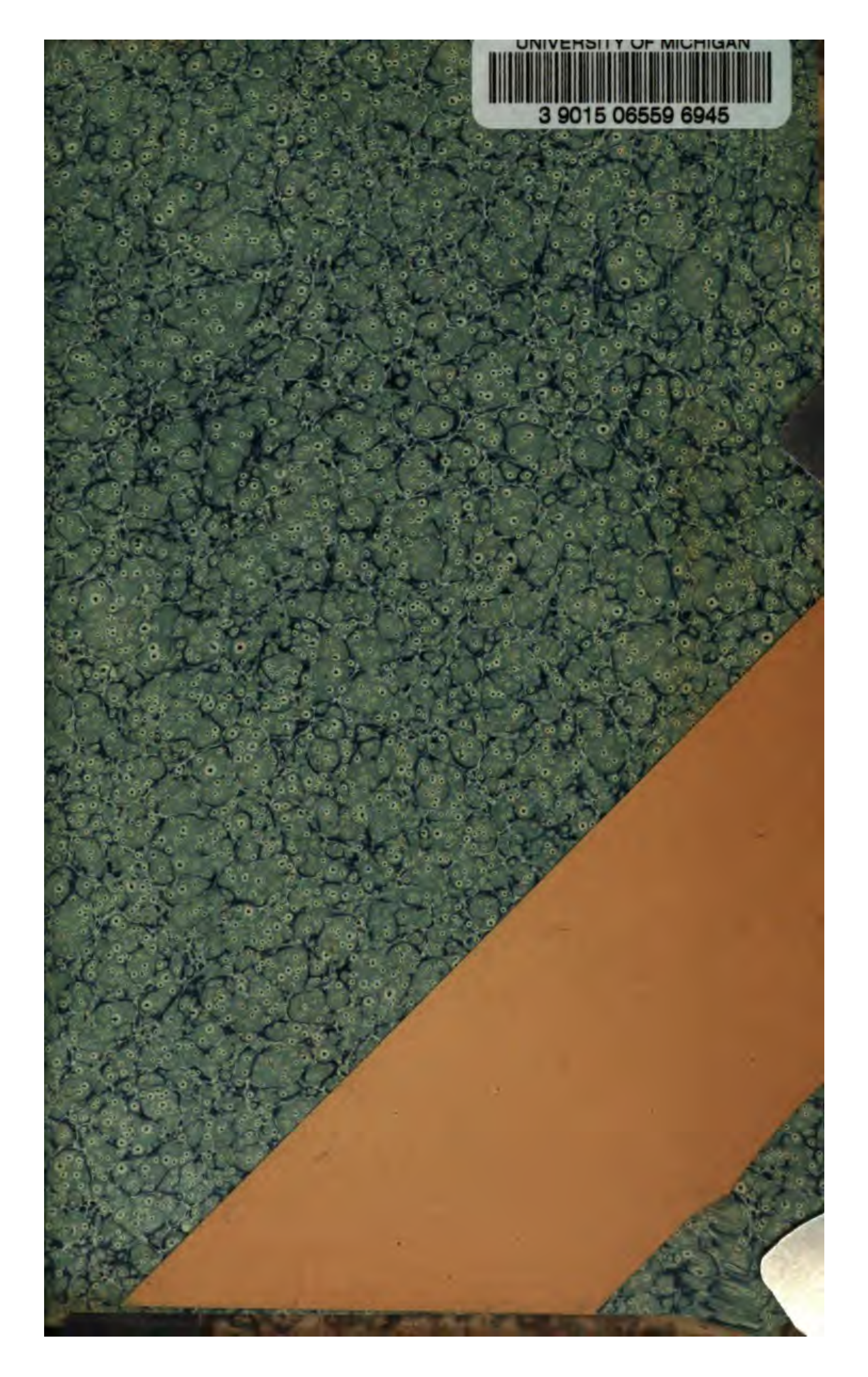


Lith. Dupont r. Grenelle St Honoré 46. Paris.



uv .
ce de 0,250 de Diamètre.
Coupe verticale.
de face.
Fig. 54
a
Fig. 49.
Fig. 48.
l'eau à collier.
Projection horizontale.
Fig. 47.
B
A
C
A
Fig. 44.




UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 06559 6945